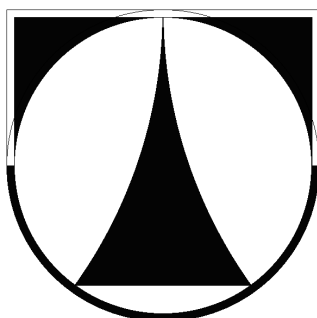


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA STROJNÍ



DISERTAČNÍ PRÁCE

**Výzkum vlivu vstřikovacích parametrů (teplota taveniny,
dotlak, rychlost) na lokální smrštění výstřiku.**

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Obor 2303V002 Strojírenská technologie

zaměření
Zpracování plastů

Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů

Výzkum vlivu vstřikovacích parametrů (teplota taveniny, dotlak, rychlost) na lokální smrštění výstřiku.

Influence of process conditions (melt temperature, holding pressure and injection rate) on local shrinkage of molded part.

Autor: Ing. Robert Záboj
Vedoucí katedry: Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
Školitel: Prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld

Rozsah práce a příloh:

Počet stran: 170
Počet obrázků: 104
Počet tabulek: 65
Počet příloh: 3

Anotace

Téma: Výzkum vlivu vstřikovacích parametrů (teplota taveniny, dotlak, rychlost) na lokální smrštění výstřiku.

Disertační práce se zabývá výzkumem vybraných vstřikovacích parametrů (dotlak, teplota taveniny a vstřikovací rychlost) na podélné, příčné výrobní smrštění a na lokální výrobní smrštění tloušťky v různé vzdálenosti od vtokového ústí na obdélníkové destičce. Pro výzkum je použit semikrystalický polymer polypropylén ve třech typových modifikacích – homopolymer PP, PP + 40% talku a PP + 40% skleněných vláken. K získání detailnějšího popisu dějů ovlivňujících smrštění byl v tvarové dutině formy snímán a vyhodnocen průběh tlaku čidly umístěnými v oblasti vtokového ústí, ve středu a na konci tokové dráhy. Vyhodnocení výsledků je provedeno statistickou analýzou plánovaného experimentu typu DOE, určující vliv zkoumaných technologických parametrů na smrštění sledovaných rozměrů zkušebních těles. Výsledky poskytují informace o vlivu vybraných parametrů na výrobní smrštění výstřiku vyrobeného ze zvolených materiálů a mohou být cenným zdrojem dat pro konstruktéry vstřikovacích forem a výstřiků ve vazbě na predikci smrštění.

Klíčová slova: vstřikování, smrštění, polypropylén, průběh tlaku v dutině

Annotation

Theme of thesis: Influence of process conditions (melt temperature, holding pressure and injection rate) on local shrinkage of molded part.

Dissertation thesis focuses on research of selected process conditions (holding pressure, melt temperature, injection rate) on longitudinal, transverse in-mould shrinkage and on local production shrinkage of thickness in various distances from gate applied on rectangular plate. Semicrystalline polymer polypropylene in three type modifications – homopolymer PP, PP + 40% talc and PP + 40% glass fibres - is used in the research. In order to obtain detailed description of processes influencing shrinkage there was captured and evaluated pressure evolution inside the mould cavity by three transducers located in the area of gate, centre and end of flow path. Evaluation of results is carried out by statistical analysis of planned DOE experiment determining influence of investigated technological parameters on shrinkage of observed dimensions of testing samples.

The results provide information about influence of selected parameters on in-mould shrinkage of moulded part produced from chosen materials and may be valuable source of data for mould designers in terms of shrinkage prediction.

Keywords: injection moulding, shrinkage, polypropylene, cavity pressure evolution

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou disertační práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. O právu autorském, zejména, § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé disertační práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li disertační práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Disertační práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací

Declaration

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/200 Coll. Applies to my dissertation in full, in particular Section 60, School work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my dissertation for the internal purposes of TUL.

If I use my dissertation of grant a license for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my dissertation on the full amount.

I compiled the dissertation on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultations.

Datum / Date: 01.07.2015

Podpis / Signature:

Poděkování

Tímto děkuji vedoucímu disertační práce prof. Dr. Ing. Petr Lenfeldovi za cenné rady a drahocenný čas strávený konzultacemi řešené problematiky. Dále děkuji všem zainteresovaným pracovníkům firmy KOH-I-NOOR Ponas spol. s.r.o. za umožnění realizace výzkumné části práce.

OBSAH

1. ÚVOD.....	11
2. REŠERŠE DOSAVADNÍCH POZNATKŮ V OBLASTI SMRŠTĚNÍ POLYMERNÍCH MATERIÁLŮ	13
2.1 Smrštění termoplastů.....	13
2.2 Vlivy vybraných parametrů na smrštění plastových dílů vyráběných technologií vstřikováním	15
2.2.1 Materiál - nadmolekulární struktura polymerů	15
2.2.2 Polypropylen – semikrystalický konstrukční polymer	21
2.3 Proces vstřikování termoplastů.....	23
2.3.1 Tok polymerní taveniny při vstřikovacím procesu	26
2.3.2 Reologické vlastnosti polymerů	28
2.3.3 Orientace a anizotropie změn	34
2.3.4 Vliv plniva na smrštění	35
2.3.5 Vliv technologických parametrů na smrštění	40
2.3.6 p-v-T charakteristiky polymerů	45
2.3.7 Proces vstřikování v p-v-T diagramu a odhad smrštění	49
2.3.8 Průběh tlaku v dutině	50
2.4 Vliv konstrukce formy a výstřiku na smrštění	54
2.5 Rozměrová přesnost vstřikovaných dílů	58
3. VÝZKUM VLIVU TECHNOLOGICKÝCH PARAMETRŮ NA PRŮBĚH TLAKU V DUTINĚ FORMY A LOKÁLNÍ VÝROBNÍ SMRŠTĚNÍ.....	60
3.1 Charakteristika použitých materiálů	61
3.1.1 Polypropylen homopolymer Dow PPH 734-52RNA	61
3.1.2 Polypropylen Scolefin 54 T 10-0.....	62
3.1.3 Polypropylen Scolefin 34 G 10-0	62
3.2 Vstřikovací forma	63
3.3 Vstřikovací stroj.....	67
3.4 Volba parametrů experimentu.....	69
3.4.1 Materiálové parametry	69
3.4.2 Konstrukční parametry.....	69
3.4.3 Technologické parametry.....	69
3.5 Metodika výpočtu výrobního smrštění	73
3.6 Měření výrobního smrštění.....	74

4. VÝSLEDKY A VYHODNOCENÍ PRŮBĚHU TLAKU V DUTINĚ FORMY ..77

4.1 Vyhodnocení průběhu tlaku v dutině formy	77
4.2 Výsledky a vyhodnocení průběhu tlaku v dutině formy pro materiál Dow PPH 734-52RNA.....	78
4.2.1 Vyhodnocení průběhu tlaku v dutině formy pro hladinu dotlaku 80 %.....	81
4.2.2 Vyhodnocení průběhu tlaku v dutině formy pro hladinu dotlaku 90 %.....	82
4.2.3 Vyhodnocení průběhu tlaku v dutině formy pro hladinu dotlaku 100 %.....	83
4.3 Výsledky a vyhodnocení průběhu tlaku v dutině formy pro materiál PP Scolefin 54 T 10-0	86
4.3.1 Vyhodnocení průběhu tlaku v dutině formy pro hladinu dotlaku 80 %.....	89
4.3.2 Vyhodnocení průběhu tlaku v dutině formy pro hladinu dotlaku 90 %.....	90
4.3.3 Vyhodnocení průběhu tlaku v dutině formy pro hladinu dotlaku 100 %.....	91
4.4 Výsledky a vyhodnocení průběhu tlaku v dutině formy pro materiál PP Scolefin 34 G 10-0	93
4.4.1 Vyhodnocení průběhu tlaku v dutině formy pro hladinu dotlaku 80 %.....	96
4.4.2 Vyhodnocení průběhu tlaku v dutině formy pro hladinu dotlaku 90 %.....	97
4.4.3 Vyhodnocení průběhu tlaku v dutině formy pro hladinu dotlaku 100 %.....	98

5. VÝSLEDKY A VYHODNOCENÍ LOKÁLNÍHO, PODELNÉHO A PŘÍČNÉHO VÝROBNÍHO SMRŠTĚNÍ VÝSTŘÍKŮ101

5.1 Data a typ výzkumných činností.....	102
5.1.1 Sledované proměnné	102
5.1.2 Faktory.....	102
5.1.3 Statistická analýza	103
5.1.4 Typ experimentu	103
5.2 Výsledky a vyhodnocení lokálního, podélného a příčného výrobního smrštění výstřiků pro materiál Dow PPH 734- 52RNA	104
5.2.1 Výsledky lokálního smrštění.....	106
5.2.2 Výsledky podélného a příčného smrštění	107
5.2.3 Vyhodnocení naměřených výsledků statistickou analýzou plánovaného experimentu typu DOE pro materiál Dow PPH 734- 52RNA.....	107
5.3 Výsledky a vyhodnocení lokálního, podélného a příčného výrobního smrštění výstřiků pro materiál PP Scolefin 54 T 10-0.....	119
5.3.1 Výsledky lokálního smrštění.....	122
5.3.2 Výsledky podélného a příčného smrštění	122
5.3.3 Vyhodnocení naměřených výsledků statistickou analýzou plánovaného experimentu typu DOE pro materiál PP Scolefin 54 T 10-0	123
5.4 Výsledky a vyhodnocení lokálního a lineárního výrobního smrštění výstřiků pro materiál PP Scolefin 34 G 10-0	136
5.4.1 Výsledky lokálního smrštění.....	138

5.4.2 Výsledky podélného a příčného smrštění	138
5.4.3 Vyhodnocení naměřených výsledků statistickou analýzou plánovaného experimentu typu DOE pro materiál PP Scolefin 34 G 10-0.....	139
6. DISKUZE VÝSLEDKŮ.....	152
6.1 Diskuze výsledků průběhu tlaku uvnitř dutiny formy pro materiál Dow PPH 734-52RNA	153
6.2 Diskuze výsledků průběhu tlaku uvnitř dutiny formy pro materiál PP Scolefin 54 T 10-0.....	153
6.3 Diskuze výsledků průběhu tlaku uvnitř dutiny formy pro materiál PP Scolefin 54 T 10-0.....	154
6.4 Diskuze vlivu technologických parametrů na lokální, podélné a příčné smrštění	154
6.4.1 Vliv technologických parametrů na lokální, podélné a příčné smrštění pro materiál Dow PPH 734- 52RNA	156
6.4.2 Vliv technologických parametrů na lokální, podélné a příčné smrštění pro materiál PP Scolefin 54 T 10-0	157
6.4.3 Vliv technologických parametrů na lokální, podélné a příčné smrštění pro materiál PP Scolefin 34 G 10-0	158
6.4.4. Shrnutí vlivu vstřikovacích parametrů na lokální, podélné a příčné smrštění	159
7. ZÁVĚR.....	160
8. PŘÍNOSY DISERTAČNÍ PRÁCE	161
9. DOPORUČENÍ PRO DALŠÍ VÝZKUM	162
10. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	163
11. PUBLIKAČNÍ ČINNOST K TÉMATU DISERTAČNÍ PRÁCE	167
12. SEZNAM PŘÍLOH A PŘÍLOHY	168

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

α	koeficient tepelné roztažnosti [K^{-1}]
α	hladina významnosti statistického testu
ϵ_b	celková tažnost [%]
Φ	konstanta mocninového zákona - koeficient tekutosti [s^{-1}]
γ	smyková deformace [1]
γ_0	počáteční smyková deformace v čase $t=0$ [1]
γ_{pist}	smyková deformace pístu reologického modelu [1]
$\gamma_{pruž}$	smyková deformace pružiny reologického modelu [1]
γ_∞	limitní rovnovážná hodnota smykové deformace v čase $t \gg \theta$ [1]
$\dot{\gamma}$	smyková rychlost [s^{-1}]
η	dynamická viskozita [$Pa \cdot s$]
π, ω, R'	parametry Van der Waalsovy stavové rovnice
θ	relaxační doba - Maxwellův model [s]
θ	retardační doba - Kelvinův model [s]
θ_i	relaxační doba i-tého prvku Maxwelllova generalizovaného modelu [s]
θ_i	retardační doba i-tého prvku Kelvinova generalizovaného modelu [s]
σ	směrodatná odchylka [1]
τ	smykové napětí [$N \cdot m^{-2}$], [Pa]
τ_0	počáteční smykové napětí v čase $t=0$ [$N \cdot m^{-2}$]
τ_{pist}	smykové napětí pístu reologického modelu [$N \cdot m^{-2}$]
$\tau_{pruž}$	smykové napětí pružiny reologického modelu [$N \cdot m^{-2}$]
A	označení parametru dotlak [%]
a_1	délka zkušebního tělesa [mm]
a_c	délka referenčních bodů tvarové dutiny [mm]
B	označení parametru teplota taveniny [$^{\circ}C$]
b_1	tloušťka referenčního bodu zkušebního tělesa [mm]
b_2	tloušťka referenčního bodu zkušebního tělesa [mm]
b_3	tloušťka referenčního bodu zkušebního tělesa [mm]
b_c	tloušťka referenčního bodu tvarové dutiny [mm]
b_i	materiálové konstanty
C	označení parametru vstřikovací rychlost [$ccm^2 \cdot s^{-1}$]

c_1	šířka referenčních bodů zkušebního tělesa [mm]
c_c	šířka ve středu tvarové dutiny [mm]
D	gradient rychlostí [s^{-1}]
Dt	dotlak [%]
D_s	dodatečné smrštění [%]
E_t	modul pružnosti [N/mm^2]
$f(t)$	kontinuální distribuční funkce (spektrum) retardačních dob Kelvinova generalizovaného modelu
G	modul pružnosti ve smyku [Pa]
$g(t)$	kontinuální distribuční funkce (spektrum) relaxačních dob Maxwellova generalizovaného modelu
G_e	modul pružnosti ve smyku připojené pružiny Maxwellova generalizovaného modelu [Pa]
G_i	modul pružnosti ve smyku i-tého prvku Maxwellova generalizovaného modelu [Pa]
J_0	poddajnost pružiny v Kelvinově modelu [Pa^{-1}]
J_i	poddajnost i-tého prvku Kelvinova modelu [Pa^{-1}]
L_f	rozměr tvarové části formy při teplotě okolí [mm]
L_v	rozměr výstřiku při teplotě okolí [mm]
L_v	rozměr výrobku stanovený v časovém rozpětí [mm]
L_{vt}	rozměr výrobku stanovený po temperování [mm]
m	hmotnost výstřiku [g]
m	konstanty (součinitele) mocninového zákona - index toku
n_s	otáčky šneku [min^{-1}]
p	tlak [MPa], [Pa]
p_d	doba dotlaku [s]
$p-v-T$	tlak–měrný objem–teplota (diagramy $p-v-T$)
$P-Value$	modifikovaná hodnota testového kritéria
$R-squared$	koeficient determinace
S_{b1}	lokální výrobní smrštění tloušťky [%]
S_{b2}	lokální výrobní smrštění tloušťky [%]
S_{b3}	lokální výrobní smrštění tloušťky [%]
S_L	lineární (délkové) smrštění [%]
S_{Mn}	výrobní smrštění ve směru kolmém na směr toku taveniny [%]
S_{Mp}	výrobní smrštění ve směru rovnoběžném se směrem toku taveniny [%]
S_P	dodatečné smrštění [%]
S_V	objemové smrštění [%]
t	čas [s], [h]

T	teplota [°C], [K]
T_t	teplota taveniny [°C]
t_d	doba dotlaku (doba doplňování dutiny formy) [s]
T_f	teplota formy [°C]
T_f	teplota viskózního toku [°C]
T_g	teplota skelného přechodu (teplota zesklenní) [°C]
t_{ch}	doba chlazení [s]
T_k	teploty jednotlivých pásem tavicí komory [°C]
T_m	teplota tání krystalů [°C]
t_m	doba manipulace [s]
t_p	doba plastikace [s]
t_{s1}, t_{s2}, t_{s3}	strojní časy [s]
t_v	doba plnění formy (doba vstřiku) [s]
v	měrný objem [cm ³ ·g ⁻¹], [m ³ ·kg ⁻¹]
V_r	vstřikovací rychlost [cm ³ ·s ⁻¹]
v_0, B, C, v_r	parametry Taitovy stavové rovnice
v_C	měrný objem výstřiku v bodě C v p-v-T diagramu [cm ³ ·g ⁻¹]
v_E	měrný objem výstřiku v bodě E v p-v-T diagramu [cm ³ ·g ⁻¹]
V_f	objem dutiny formy při 23°C [cm ³]
V_v	objem výstřiku při 23°C [cm ³]
V_E	objem výstřiku v bodě E v p-v-T diagramu [cm ³]
ABS	akrylonitril-butadién-styrén
HDPE	vysokohustotní polyetylén
MDPE	rozvětvený polyetylén
PA6	polyamid 6
PA66	polyamid 66
PP	polypropylén
PS	polystyrén

1. ÚVOD

Vstřikování je jednou z nejvýznamnějších technologií zpracování termoplastických polymerů. Touto technologií je vyráběno více než 30% produkce všech plastových výrobků a je vhodná pro velkosériovou výrobu součástí i finálních výrobků různých tvarů a velikostí. U některých technických aplikací, především v automobilovém průmyslu, jsou požadovány velmi těsné rozměrové tolerance. Plastové výstřiky, které vstupují do složitějších montážních celků, proto musí být vyrobeny dle přesné rozměrové specifikace. Finální vlastnosti výrobku závisí na několika faktorech, mezi něž lze zahrnout materiálové vlastnosti polymeru, konstrukci formy a výstřiku a procesní parametry. Stále se zvyšující požadavky na přísnou kontrolu geometrie a funkčnosti plastových komponentů vyžadují systematický výzkum technologie vstřikování plastů s důrazem na rozměrovou stabilitu.

Mezi nejdůležitější vlastnosti polymerů vyráběných technologií vstřikování patří smrštění, které zásadně ovlivňuje výsledné kvalitativní a rozměrové požadavky na vyráběný díl. Smrštění termoplastů není materiálovou konstantou, ale je závislé na mnoha systémových parametrech a jejich vzájemných interakcích. To sebou nese nároky na komplexní znalost problematiky související s procesem vstřikování počínaje volbou materiálu, konstrukcí nástroje a dílu, až po technologii s cílem konstruovat a vyrobit díly s přesně vymezenými vlastnostmi. Problematika smrštění popisovaná v literatuře je ovšem natolik složitá, že předem stanovit přesné hodnoty rozměrů tvarové dutiny formy a technologické parametry v jednotlivých směrech je velmi obtížné. Hodnoty smrštění udávané v materiálových listech výrobců polymerů mají pouze informativní charakter a obvykle neobsahují data vztahující se k anizotropii smrštění vyjádřených rozdílem smrštění ve směru toku taveniny a ve směru kolmém na tok taveniny nebo v konkrétních pozicích výlisku. Do určité míry lze využít simulační programy, kde jsou pro některé polymery udávána data smrštění naměřená na zkušební formě za konkrétních podmínek.

Z hlediska technologie vstřikování je důležitým aspektem správné nastavení vstupních procesních parametrů, které mají významný vliv na kontrolu rozměrů a redukci smrštění. Obecně jsou požadované procesní parametry určovány na základě praktických zkušeností nebo s použitím odborné literatury. Tento způsob

však stále nezaručuje, že takto s určenými parametry bude zaručena výrobu dílů s minimálními rozměrovými defekty. Vliv technologických parametrů na materiál uvnitř dutiny formy nelze jednoznačně určit vzhledem k různým rušivým jevům, které doprovázejí vstřikovací proces. Daleko přesnější popis lze získat měřením některých parametrů uvnitř dutiny formy, především sledováním průběhu tlaku a teploty taveniny, které významně určují kvalitativní charakteristiky vstřikovaných dílů. Přítomnost průvodních a následných jevů má za následek, že identický průběh nastavených parametrů na stroji v každém cyklu nemusí odpovídat identickému průběhu parametrů při procesu, například nastavený hydraulický tlak ve vstřikovacím válci v jednotlivých cyklech nemusí korespondovat s reálným tlakem taveniny v dutině formy.

Předkládaná disertační práce se zaměřuje na výzkum vlivu zvolených procesních parametrů s cílem dosáhnout co nejoptimálnějších podmínek vstřikování ve vazbě na rozměrovou stabilitu výstřiku – obdélníkové zkušební destičky – aplikovaných u semikrystalického termoplastu (PP), ve třech typových modifikacích (homopolymer PP, PP + 40 % talek, PP + 40% skleněná vlákna).

Pro řešení byly stanoveny následující cíle disertační práce:

- Provedení rešerše a teoretického rozboru problematiky zaměřené na smrštění termoplastů
- Návrh konstrukčního řešení vstřikovací formy pro výrobu zkušebních těles
- Provedení experimentálních měření pro zvolené parametry procesu a vyhodnocení dat vlivu vybraných procesních a materiálových parametrů na velikost lokálního a lineárního výrobního smrštění.
- Vyhodnocení naměřených výsledků statistickou analýzou plánovaného experimentu DOE

2. REŠERŠE DOSAVADNÍCH POZNATKŮ V OBLASTI SMRŠTĚNÍ POLYMERNÍCH MATERIÁLŮ

Smrštění vstřikovaných dílů z termoplastů je typický jev spjatý se vstřikovacím procesem, který je způsoben objemovou kontrakcí během i po skončení vstřikovacího cyklu. Nezávisí pouze na charakteristice materiálu, ale také na procesních podmínkách a jejich vzájemných interakcích (konstrukce dílu a formy, vstřikovací parametry, termodynamické podmínky, aj.), které určují distribuci tlakové a teplotní historie uvnitř dutiny formy. Některé z těchto podmínek mohou mít na smrštění větší vliv, jiné mohou být naopak téměř nevýznamné, ale o jejich vlivu nelze uvažovat separátně. Jejich kombinace může působit ve vlivu na smrštění synergicky, nebo se mohou navzájem potlačovat.

Pro popsání konkrétního působení těchto vlivů je nezbytné pochopení fyzikálních zákonitostí dějů odehrávajících se v materiálu vstřikovaného výrobku během procesu vstřikování a i po skončení tohoto procesu.

Smrštění termoplastů je obecně závislé na třech hlavních systémových parametrech:

- a) Materiál – nadmolekulární struktura (stupeň krystalinity), reologické vlastnosti taveniny, obsah a typ plniva, anizotropie
- b) Procesní parametry – teplota formy, teplota taveniny, rychlost vstřikování, dotlak, doba dotlaku, průběh tlaku v dutině formy, křivky v pvT diagramech
- c) Konstrukce výstřiku a formy – tloušťka výstřiku, umístění a průřez vtoku, temperace formy

2.1 Smrštění termoplastů [14,15]

Smrštění polymerů je objemová změna, způsobená chemickými nebo fyzikálními ději při procesu tváření. Během vstřikovacího procesu dochází k redukci specifického objemu o téměř 35% při změně z kapalného do tuhého stavu. Tok taveniny skrze vtok, rozváděcí kanály a tvarovou částí formy vyvolává orientaci makromolekul, která představuje směrovou složku smrštění.

Smrštění termoplastů lze charakterizovat dvěma širšími klasifikacemi – objemové a lineární. Objemové smrštění je svázáno jak s termální kontrakcí, ke které dochází u obecně u všech polymerů, tak s krystalizačními procesy probíhajícími u semikrystalických polymerů. Pokud v celém systému nepůsobí žádné další síly, lze objemové smrštění charakterizovat jako izotropní. Je-li

polymeru dodáno určité množství tepla, zvýší tato externí energie pohyb molekul a oslabí soudržnou energii vazeb jak primárních atomů, tak molekulových řetězců. Jak se atomy a molekuly od sebe vzdalují, dochází ke zvýšení specifického objemu polymeru. Velikost expanze je úměrná teple dodanému do polymeru. Během následného chlazení dojde k rovnoměrně rozložené ortotropní kontrakci, pokud nepůsobí jiné síly.

Lineární smrštění je důsledkem smykových a extenzních sil působících na polymer během plnicí a dotlakové fáze. Tyto síly vyvolávají orientaci makromolekul polymeru a v případě obsahu plniv i orientaci těchto částic. Vzájemný poměr mezi lineárním a objemovým smrštěním je přibližně 1:3

Smrštění se projevuje hlavně v průběhu tuhnutí taveniny a v čase bezprostředně při vyhození z formy označované jako výrobní objemové smrštění. V praxi se zpravidla určuje 48 hodin po vyhození z formy.

Toto tzv. výrobní smrštění je možné určit ze vztahu:

$$S_v = \frac{V_f - V_v}{V_f} \cdot 100 [\%]; \quad (1)$$

kde V_f [cm³] - objem tvarové dutiny za okolní teploty

V_v [cm³] - objem výstřiku za okolní teploty

Pro praxi, především pro konstrukci je nutno použít vztah pro lineární smrštění:

$$S_L = \frac{L_f - L_v}{L_f} \cdot 100 [\%]; \quad (2)$$

kde L_f [mm] - rozměr tvarové dutiny za okolní teploty

L_v [mm] - rozměr výstřiku za okolní teploty

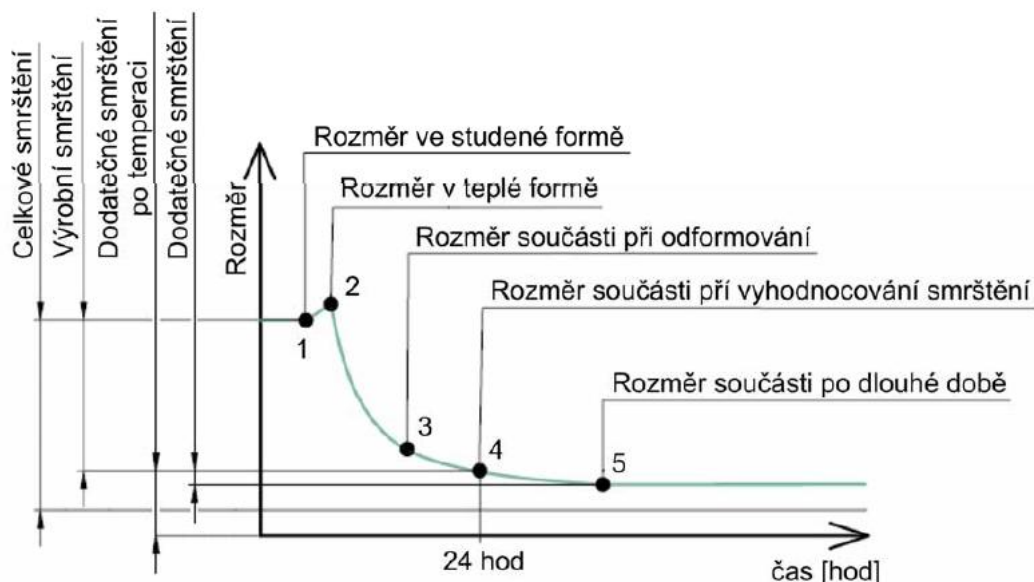
Smrštění však v menší intenzitě pokračuje i po určité době od vyrobení součástí. Tento jev se nazývá dodatečné smrštění a je způsoben stárnutím a rekrystalizačními pochody. Ke změně rozměru dochází vystavením výstřiku zvýšené teplotě (temperování) nebo rozměrová změna proběhla ve výrobku při normální teplotě, avšak po delším časovém odstupu od vyrobení. Toto smrštění má obvykle lineární charakter na logaritmické časové ose.

Dodatečné smrštění se vyjadřuje v procentech z původního rozměru výrobku:

$$D_S = \frac{L_v - L_{vt}}{L_v} \cdot 100 [\%]; \quad (3)$$

kde L_v [mm] - rozměr výrobku stanovený v časové rozpětí
předepsaném pro smrštění

L_{vt} [mm] - rozměr výrobku stanovený po temperování
nebo po delším smluvním čase



Obr. 1: Rozměrové změny vstřikovaného dílu v čase [16]

2.2 Vlivy vybraných parametrů na smrštění plastových dílů vyráběných technologií vstřikováním

2.2.1 Materiál - nadmolekulární struktura polymerů

[8,9,17,18,19,20,21,22]

Významný vliv na vlastnosti plastů má jejich nadmolekulární struktura – morfologie polymerů – popisující uspořádání makromolekulárních řetězců v krystalických a amorfních strukturách, které představují mezní stavy uspořádanosti a způsob budování heterogenních systémů z těchto strukturně odlišných oblastí.

Tvar makromolekul je důležitým faktorem určujícím chování polymerů. Lineární polymery mají monomerní jednotky spojeny do hladkých lineárních řetězců. V některých případech mohou být na základní řetězec napojeny krátké i delší boční větve vytvořené malým počtem atomů a pak se jedná o molekuly rozvětvené. Velikost a množství bočních větví má vliv na pokles

mezimolekulárních sil a snižuje tendenci ke krystalizaci. Jsou-li makromolekulární řetězce uspořádané do prostorové sítě a příčné vazby jsou tvořeny chemickou vazbou, potom se nazývají reaktoplasty.

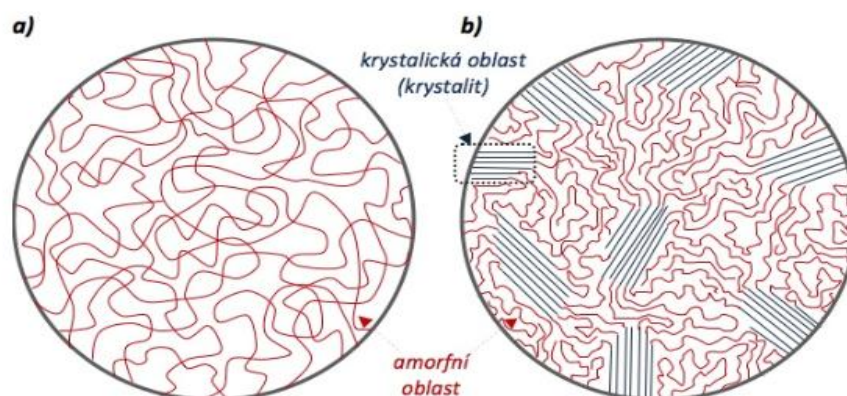
Makromolekulární řetězce nabývají různých geometrických uspořádání neboli konformací vlivem neustálého pohybu jednotlivých částí řetězce (segmentů) – jsou tedy ohebné. Jejich ohebnost závisí na možnosti rotace kolem jednoduchých vazeb v řetězci. Při vyšších teplotách, v tavenině nebo v roztoku za okolní teploty se tvar řetězce blíží neuspořádané, klubkovité konformaci. Tvar těchto klubek se vlivem vnějších sil mění a jedná se o vratný děj. Tuto vlastnost lze popsat projevem nazývaným kaučukovité chování polymerů, kdy účinkem malých sil dochází k velkým, avšak vratným deformacím.

Polymery lze rozdělit podle jejich schopnosti krystalizace. Při ochlazení z taveniny se makromolekuly polymerů uspořádávají do více nebo méně uspořádaných útvarů. Podle výsledné nadmolekulární struktury je lze rozdělit na:

Amorfní polymery – které jsou vytvořeny z chaoticky stočených makromolekul, které mohou být vzájemně propleteny

Krystalické polymery – vytvářejí pravidelně naskládané makromolekulární útvary – krystality, které jsou obklopeny neuspořádanými amorfními oblastmi. U těchto polymerů tedy nedochází k úplné krystalizaci, jsou tedy semikrystalické a obsahují uspořádané, krystalické oblasti a oblasti neuspořádané, amorfní. Vyznačují se úzkou oblastí kaučukovitosti, takže rychle přecházejí z tuhé do kapalné fáze, jsou elastické, mají vysokou pevnost a houževnatost.

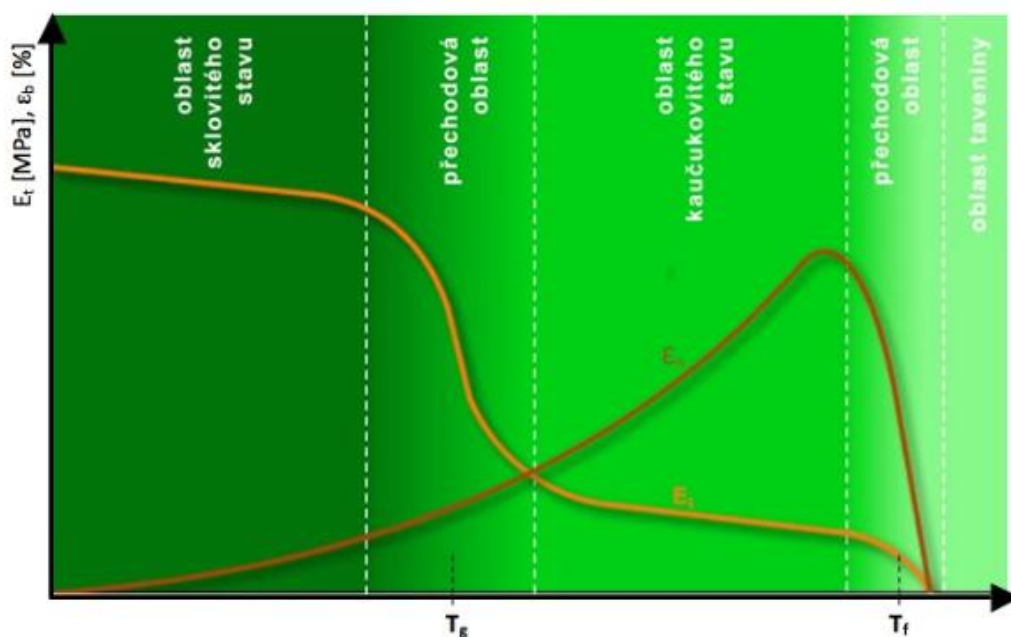
Schéma nadmolekulární struktury polymerů je uvedeno na obrázku 2.



Obr. 2: Schéma nadmolekulární struktury polymerů a) amorfní;
b) semikrystalické [17]

Amorfní polymery mají dvě charakteristická přechodová pásma teplot a to teplotu skelného přechodu (T_g) a teplotu viskózního toku (T_f). Pod teplotou skelného přechodu Brownův mikropohyb prakticky ustává (vzájemná poloha makromolekul se téměř nemění), polymer je ve stavu sklovitém a je tedy tvrdý, křehký a má vysoký modul pružnosti. V přechodové oblasti T_g získává polymer kaučukovitou pružnost a jeho vlastnosti se mění skokem – např. modul pružnosti asi o tři řády, koeficient teplotní roztažnosti o 100% (obr. 3). Ke skokovým změnám dochází v důsledku uvolňování rotačního pohybu segmentů molekul a poklesem mezimolekulárních sil. Dalším zvyšováním teploty nad T_g se zvyšuje Brownův makropohyb (molekuly se již pohybují jako celek a mění vzájemnou polohu) a dosažením teploty viskózního toku T_f nabývá látka charakteru viskózní kapaliny. V této oblasti klesá modul pružnosti na nulovou hodnotu. Nad teplotou T_f převládají nevratné deformace a určující je viskózní tok. Nad touto teplotou se nachází oblast zpracování amorfních polymerů např. vstřikováním.

Teplota zesklennění závisí na chemickém složení polymeru, tedy na ohebnosti řetězce, symetričnosti základních článků makromolekuly a na velikosti mezimolekulárních sil. Hodnota teploty zesklennění klesá se zvyšující se ohebností řetězců a klesající velikostí mezimolekulárních sil a lze ji ovlivnit např. přidáním změkčovadel (snížení mezimolekulární soudržnosti), nebo kopolymerací monomerů zvyšujících pohyblivost makromolekul.

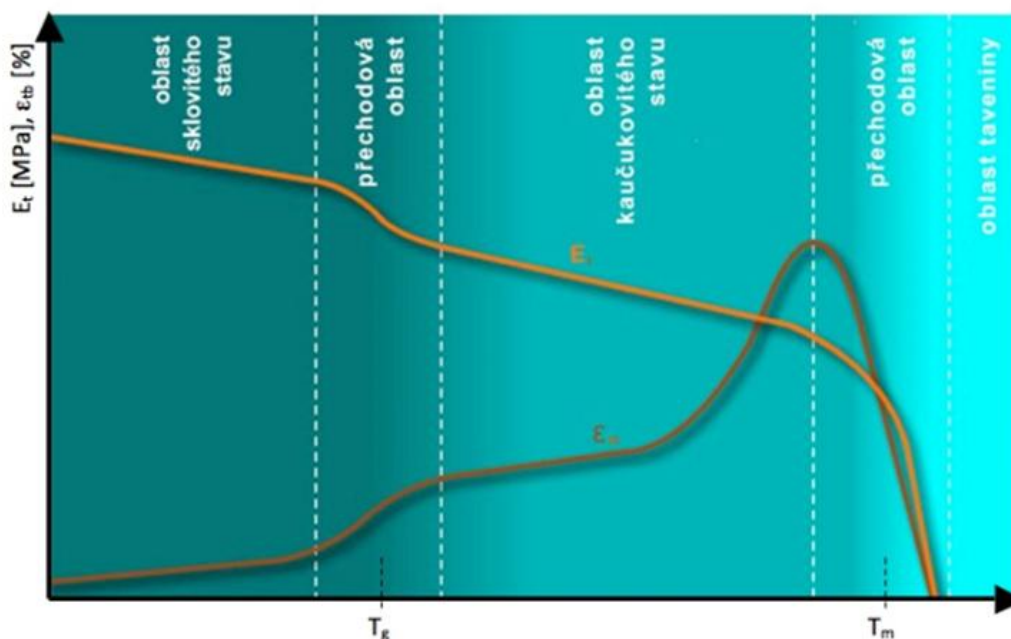


Obr. 3: Závislost modulu pružnosti (E) a celkové tažnosti (ϵ_{tb}) amorfního termoplastu na teplotě [17]

Semikrystalické polymery vykazují nejrychlejší změny v oblasti teplot charakterizovanou teplotou tání krystalů (T_m). V oblasti T_m se začínají krystality rozpadat vlivem zvýšené intenzity tepelných vibrací krystalové mřížky a polymer přechází z pevného do kapalného. Hodnota T_m není jednoznačně určena, ale představuje určitý teplotní rozsah a závisí na molekulové hmotnosti a velikosti vazebních sil. Zvyšováním těchto veličin se zvyšuje i teplota tání. Nad touto teplotou se nachází rozsah zpracovatelských teplot pro technologii tváření semikrystalických polymerů.

Vzhledem k určitému podílu amorfní fáze lze i semikrystalických polymerů určit oblast teploty zesklňování T_g , kde dochází ke skokovým změnám některých vlastností. Tyto projevy však nejsou tak výrazné a klesají s rostoucím podílem krystalové fáze. Z obr. 4 lze pozorovat, že si semikrystalické polymery udržují dobré mechanické vlastnosti i v oblasti mezi přechodovými teplotami T_g a T_m . U semikrystalických polymerů dochází k viskóznímu toku T_f po rozpadu krystalové struktury, tedy nad T_m .

Hranice použitelnosti semikrystalických polymerů se nachází pod oblastí T_m a s ohledem na spolehlivou funkci vstřikovaných dílů se v praxi volí přibližně o (20 – 40)°C pod oblastí teploty tání T_m . Maximální teplotu je nutno volit s přihlédnutím ke způsobu namáhání dílu a době působení teplotního zatížení.



Obr. 4: Závislost modulu pružnosti (E_t) a celkové tažnosti (ϵ_{tb}) semikrystalického polymeru na teplotě [17]

Krystalizace může nastat pouze u semikrystalických polymerů a je podmíněna chemickou stavbou makromolekulárního řetězce. Na rozdíl od amorfních polymerů mají semikrystalické ostrý přechod mezi kaučukovitým stavem a amorfní taveninou z důvodu rozpadu krystalické struktury. Krystalizace polymerů zahrnuje místní uspořádání krátkých délek (segmentů) sousedních řetězců. Růst krystalitů při tuhnutí začíná kolem krystalizačních zárodků a krystalové struktury rostou radiálně z každého zárodku během primární krystalizace. Výsledná struktura je sférolitická. Sférolity se skládají z vrstev krystalických lamel a jsou mezi sebou odděleny amorfni nekrystalizovanou oblastí.

Sekundární krystalizace je proces, kdy se dostupné molekulové segmenty připojují k již vzniklým krystalům. Sekundární krystalizace je pomalejší a je příčinou dodatečného smrštění výstřiků při ohřevu nad teplotu T_g příslušného polymeru.

Na krystalizaci lze nahlížet jako na kinetický, tak i termodynamický proces. Z hlediska kinetiky je nukleace a krystalizace určena stupněm podchlazení (teplota taveniny – teplota krystalizace). Z hlediska termodynamického jsou krystality ve stavu s nejnižší energií způsobeného exotermickou přeměnou taveniny na pevnou krystalovou mřížku (charakteristickou pro konkrétní semikrystalický polymer). Přidáním nukleačního činidla klesá stupeň podchlazení potřebný pro zahájení krystalizace a rovněž vzniká jemnozrnnější struktura. Absolutní stupeň krystalinity je závislý na rychlosti krystalizace a rychlosti chlazení. Při vstřikování plastů není většina semikrystalických polymerů schopna dosáhnout svého možného stupně krystalinity kvůli rychlému chladnutí taveniny ve studené formě. Hustota pevného polymeru je proporcionální stupni krystalinity, což je způsobeno těsným uspořádáním řetězců v krystalové mřížce.

Protože krystalizace je proces, při kterém dochází k zmenšení objemu, vykazují krystalické polymery větší smrštění, než kdyby ke krystalizaci nedošlo (viz. Tab. 1).

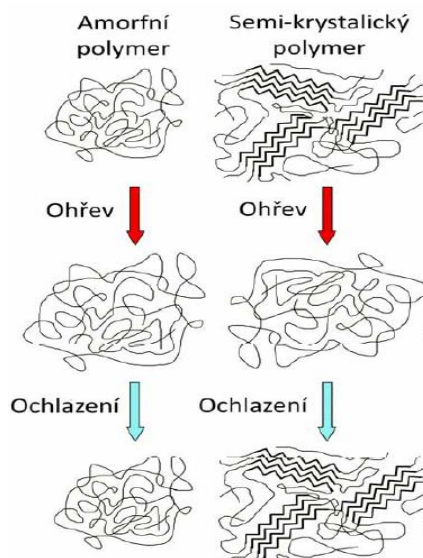
Tab. 1: Velikost smrštění pro vybrané druhy amorfních a semikrystalických materiálů [28]

Termoplast	Smrštění [%]	Termoplast	Smrštění [%]
LDPE	1,5 až 3,0	PA6	1,0 až 2,5
HDPE	2,0 až 4,0	PA66	1,0 až 2,0
PP	1,5 až 2,0	POM	1,0 až 3,2
PS	0,2 až 0,5	PC	0,6 až 0,8
ABS	0,4 až 0,7	PBT	1,7 až 2,3
PVC	0,2 až 0,6	PMMA	0,3 až 0,8

Nízká rychlost ochlazování nebo nízký stupeň krystalinity redukuje smrštění a tedy i deformaci. Krystalizace probíhá převážně při tuhnutí taveniny ve formě, později i v hotovém výrobku dochází k velmi pozvolné dodatečné krystalizaci způsobující možnost deformací nebo pnutí.

Na smrštění semikrystalických polymerů má významný vliv i molekulová hmotnost. Polymery s vysokou molekulovou hmotností vykazují vyšší viskozitu při plnění formy a tedy i vyšší tlakový pokles v dutině formy. Tlakový pokles se kompenzuje vyšším vstřikovacím tlakem, jinak dochází k výraznému smrštění.

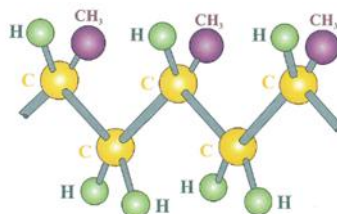
Větvené polymery krystalizují odlišně od lineárních. Přítomnost bočních řetězců na základním řetězci brání molekulám připojit se k vznikající krystalové struktuře. Čím delší je boční řetězec, tím menší je možnost krystalizace. Vysoce rozvětvené polymery mají vyšší stupeň neuspořádanosti, což také potlačuje krystalizaci, např. lineární polyetylen (HDPE) je vyráběn s nízkým stupněm rozvětvení a snadno krystalizuje. Stupeň krystalizace HDPE má rozsah od 60 – 80 %. Naproti tomu více rozvětvený polyetylen (MDPE) dosahuje pouze kolem 50% krystalinity.



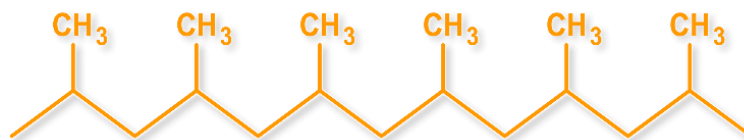
Obr. 5: Změny struktury amorfního a semikrystalického polymeru vlivem teploty [20]

2.2.2 Polypropylen – semikrystalický konstrukční polymer [1,2,3]

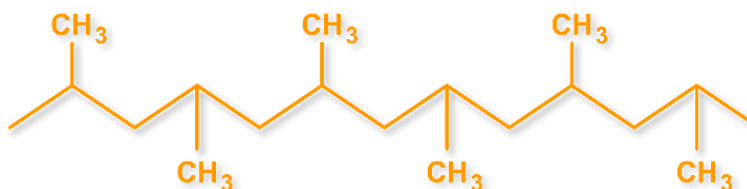
Polypropylen (PP) je krystalický polymer o stupni krystalinity 60 – 70 % a má v podstatě nepolární strukturu. Základní struktura polypropyleny znázorněná na obrázku 6 je izotaktická, semikrystalická ve tvaru šroubovice. Tato struktura umožňuje dosáhnout dobrých mechanických vlastností, jako je tuhost a pevnost v tahu. Mechanické vlastnosti můžou být dále zvyšovány nukleačními činidly, minerálními plnivy nebo skleněnými vlákny. Podle stereochemické struktury lze polypropylen rozdělit na izotaktický (viz. Obr. 7) – všechny methylskupiny jsou na stejné straně roviny proložené základním řetězcem, syndiotaktický (viz. Obr. 8) - methylskupiny jsou střídavě rozloženy nad a pod rovinou a ataktický (viz. Obr. 9) - methylskupiny mají statistickou distribuci. Všechny formy polypropyleny jsou náchylné k oxidaci díky trojmocnému vodíku.



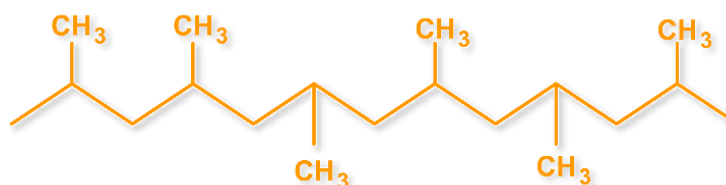
Obr. 6: Chemická struktura PP [1]



Obr. 7: Izotaktický PP [3]



Obr. 8: Syndiotaktický PP [3]



Obr. 9: Ataktický PP [3]

Polypropylen je nabízen jako homopolymer, statický (random) kopolymer, nebo kopolymer s rázovou odolností. Homopolymery mají vyšší bod teploty tání a tuhost se velkým rozsahem tokových vlastností. Kopolymery obsahují malé množství etylenu způsobující snížení stupně krystalinity, což vylepšuje rázovou odolnost a zvyšuje ohebnost. Bod teploty tání kopolymeru je v porovnání s homopolymerem nižší. Kopolymery s rázovou odolností jsou kopolymerizovány v reaktoru přidáním etylenu. Kopolymer působí jako plastifikátor a je rovnoměrně dispergován v matici homopolymeru do formy heterofázového polymeru. Tento kopolymer má vysokou rázovou odolnost i při nízkých teplotách. V technické praxi se používá na výrobu interiérových dílů automobilu, části klimatizací nebo nárazníky.

Mezi přednosti polypropylenu patří nízká hustota (0.90 g/cm^3), vysoký bod tání, použití v prostředí s vyšší teplotou, chemická odolnost vůči uhlovodíkům, alkoholům. Nevýhodou je nízká odolnost proti UV záření, aromatickým roztokům, chlorovaným rozpouštědly a obtížnost vytváření vazeb.

2.3 Proces vstřikování termoplastů [8,9,10,11,12]

Základní prvky pro vstřikování plastů jsou vstřikovací stroj a forma. Dále jsou do procesu zahrnuty další periferní technologie jako temperační jednotky, čidla, sušky materiálu, roboti atd. z důvodu zlepšení kvality a efektivity výroby.

Vstřikování plastů lze uvažovat jako cyklický proces, během něhož probíhá komplex fyzikálních dějů. Skládá se z těchto hlavních fází: plastikace materiálu v tavící komoře stroje, uzavření formy, vstříknutí taveniny do formy (plnicí fáze), dotlak, chladnutí taveniny ve formě. Cyklus je ukončen otevřením formy a vyhozením výstřiku.

a) Plastikace materiálu v tavící komoře

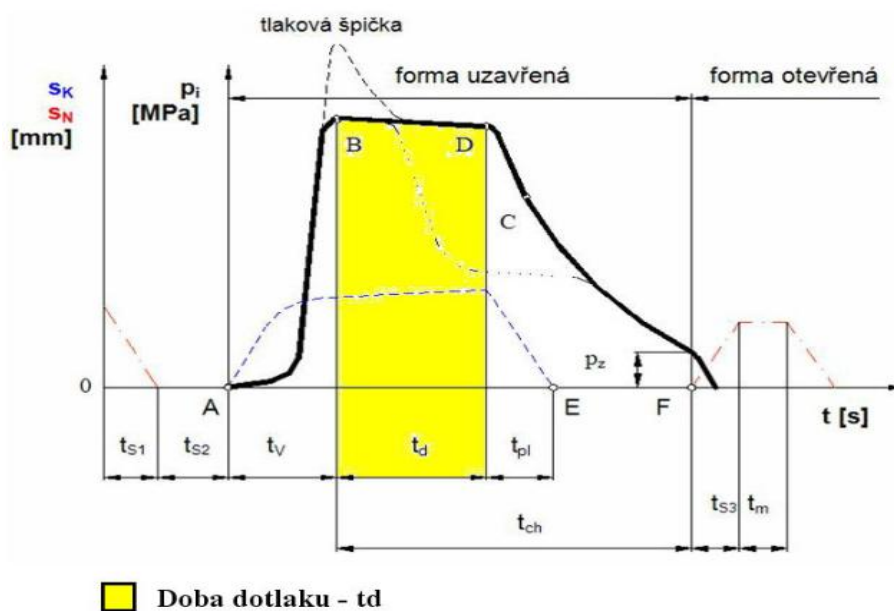
Materiál, obvykle ve formě granulí, vstupuje z násypky do tavící komory stroje, v němž je otočně a posuvně uložen plastikační šnek. Granule se uvnitř komory taví a to jak teplem dodaným elektrickými topnými pásy, tak především třením mezi hmotou (granulemi) a šnekem. Toto frikční teplo lze „programovat“ změnou protitlaku, případně otáček šneku. Během plastikace se šnek otáčí a posouvá vzad proti nastavenému hydraulickému tlaku, granulát se postupně plastikuje a posouvá před čelo šneku do požadovaného objemu, nutného pro zaplnění dutiny. Základním předpokladem pro rovnoměrné naplnění dutiny formy je teplotně a viskózně homogenní dávka před čelem šneku.

b) Plnicí fáze

Při vstřikování se šnek neotáčí, ale pohybuje se v axiálním směru vpřed a vytlačuje taveninu skrze vtokový systém do tvarové dutiny. Plnění je ovlivňováno typem vtokového systému, velikostí a tvarem dutiny, násobností, vstřikovacím tlakem a rychlostí, teplotním profilem a termodynamickým stavem taveniny. Dutina se nejprve plní objemově, tedy bez odporu, poté se rychlost plnění zmenšuje, protože materiál přebírá tvar dutiny a jeho tlak stoupá až do limitní hodnoty (50 – 200MPa). Ze základních technologických parametrů jsou pro tuto fázi rozhodující vstřikovací tlak, teplota taveniny a vstřikovací rychlost. Cílem je vytvořit takový profil rychlosti vstřikování, aby byla tvarová dutina plněna rovnoměrně a zabránilo se předčasnému tuhnutí hmoty. Vysoká vstřikovací rychlost má příznivý vliv na orientaci makromolekul ve výstřiku. V posledním časovém úseku fáze plnění, kdy dochází k přepnutí vstřikovacího tlaku na dotlak je nutno vstřikovací rychlost snížit, aby ve formě nevznikla tlaková špička způsobující přeplnění formy (zvýšená hmotnost výstřiku, zvětšené rozměry a vnitřní pnutí).

c) Dotlaková fáze

Účelem dotlaku je po ukončení plnicí fáze dotlačit další taveninu do formy (dle velikosti výrobku) k vyrovnání objemového smrštění výstřiku během chladnutí (viz Obr. 10). Působením smrštění tlak ve formě klesá až na úroveň zbytkové hodnoty. Dotlak má trvat tak dlouho, dokud neztuhne ústí vtoku. Je-li ukončen před ztuhnutím vtoku, mohou vzniknout v silnostěnných částech výstřiku propadliny a nastat zpětný tok taveniny z formy do trysky. Studie [11] ukazuje, že nedostatečný dotlak má za následek předčasné smrštění způsobující rozměrové odchylky a propadliny. Naopak příliš pozdní přepnutí vstřikovacího tlaku na dotlak omezuje pohyblivost makromolekul během solidifikace a tím vyvolává vnitřní napětí v tuhnoucí tavenině. Prodlužování dotlaku po zatuhnutí vtokového ústí je bezúčelné. Dotlaková fáze ovlivňuje především hmotnost, kompenzuje rozměrové změny vyvolané smršťováním dílu v dutině formy dotlačováním malého množství taveniny v průběhu ochlazování, homogenitu a orientaci makromolekul, zejména v oblasti vtoku.



Obr. 10: Dotlak a doba dotlaku [12]

d) Fáze chladnutí

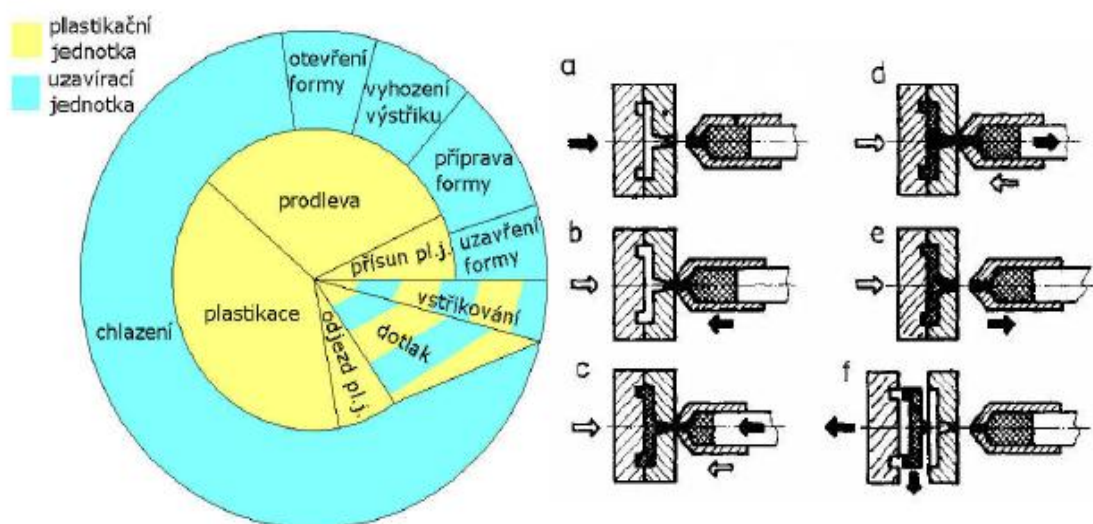
Chladnutí začíná již během vstřikovací fáze a pokračuje po celou dobu fáze dotlaku. Během celého procesu chladnutí klesá teplota v průřezu výstřiku a dochází k místním i časovým změnám stavových veličin polymeru (tlak, měrný

objem a teplota). Průběh stavových veličin je v různých místech odlišný a je ovlivněn geometrií výstřiku, tloušťkou stěn a technologickými parametry procesu. Změny stavových veličin potom mají přímý dopad na finální vlastnosti výstřiku. Technologické parametry ovlivňující fázi chlazení jsou teplota formy, teplota taveniny a teplota vyhazování výstřiku z formy. Gradient ochlazování v pásmu nad T_g u amorfních, resp. nad T_m u semikrystalických polymerů má podstatný vliv na relaxační jevy ovlivňující orientaci. U semikrystalických polymerů je gradient ochlazování určující pro krystalickou strukturu. Teplota formy má dále vliv na povrchový lesk – u amorfních se zvyšující se teplotou vzrůstá a semikrystalických mírně klesá.

e) Vyjmutí výstřiku z formy

Tlak v dutině formy klesá během procesu až na určitou reziduální hodnotu, pod kterou se již solidifikovaný materiál nachází těsně před otevřením formy. Příliš vysoký zbytkový tlak zvyšuje velikost vyhazovací síly, čímž by mohlo dojít k poškození a deformaci výlisku při vyjímání z dutiny formy. Dále je třeba brát zřetel na teplotu při odformování, která musí být taková, aby byl výstřík již dostatečně tuhý a při vyjímání z dutiny se nedeformoval.

Schématicky jsou jednotlivé fáze zobrazeny na obrázku 11.

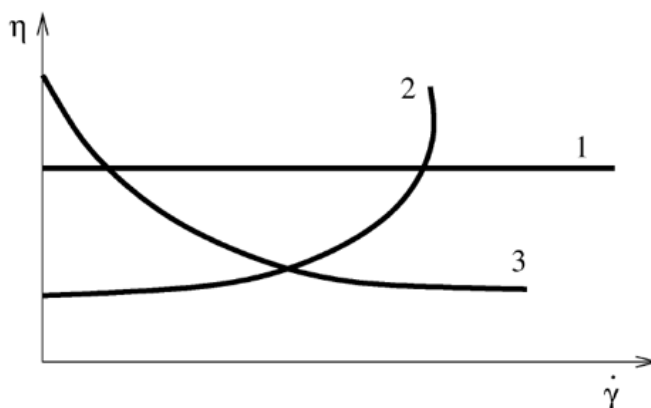


Obr.11: Jednotlivé fáze vstřikovacího cyklu [13]

2.3.1 Tok polymerní taveniny při vstřikovacím procesu [9,13,14,26,27]

Viskozita většiny běžných kapalin je ovlivněna změnou teploty, ale zůstává konstantní s měnící se smykovou rychlostí. Takováto kapalina se nazývá Newtonská. Viskozita polymerů však představuje mnohem komplikovanější děj.

Při velmi nízkých smykových rychlostech lze viskozitu polymerní taveniny uvažovat jako Newtonskou kapalinu, zatímco při vysoké smykové rychlosti vykazuje nenewtonské chování charakterizované mocninovým zákonem, kde viskozita klesá s rostoucí smykovou rychlostí. Tok většiny polymerních materiálů je charakterizován jako pseudoplastický, nenewtonský. Viskozita takových materiálů klesá se vzrůstající smykovou rychlostí na rozdíl od dilatantních nenewtonských kapalin, kde roste viskozita se zvyšující smykovou rychlostí (viz. Obr. 12).



Obr. 12: Závislost viskozity na smykové rychlosti (1) newtonská kapalina, (2) dilatantní nenewtonská kapalina, (3) nenewtonská pseudoplastická kapalina [26]

Redukce viskozity pseudoplastických látek vychází ze smykového napětí, které orientuje řetězce polymerů. Vlivem napětí se řetězce rozplétají a snadněji se po sobě pohybují (tečou). Tento děj způsobuje, že se viskozita polymerní taveniny snižuje, čím rychleji je materiál vstřikován do dutiny formy. Tato vlastnost umožňuje snížení tlakového poklesu v dutině zvýšením rychlosti toku taveniny. V případě technologie vstřikování plastů, kratší doba plnění formy (vyšší vstřikovací rychlost) redukuje potřebný vstřikovací tlak pro naplnění dutiny formy.

Pseudoplastické nenewtonské kapaliny se popisují rovnicemi, které se podle počtu konstant rozlišují na modely dvouparametrické, tříparametrické, atd. Tyto rovnice by měly obsahovat co nejméně empirických konstant, které mají mít fyzikální význam a měla by být zabezpečena shoda mezi experimentálními a

vypočítanými hodnotami tokových veličin. Pro střední a vyšší smykové rychlosti lze u polymerních tavenin použít nejjednodušší model popisující závislost smykového napětí na smykové rychlosti, tzv. mocninový zákon, který lze popsat následujícím tvarem mocninové rovnice:

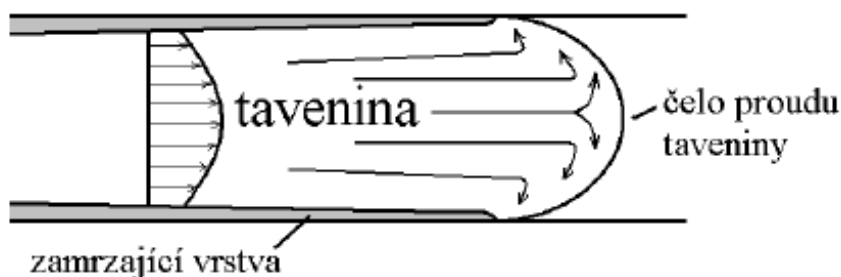
$$D = \Phi \cdot \tau^m \quad (4)$$

D - je gradient rychlostí (dv/dy) [s^{-1}] (rozdíl rychlostí 2 sousedních vrstev dělený jejich vzdáleností),

m - je exponent mocninového zákona vyjadřující velikost odchylky tokového chování taveniny od chování newtonské kapaliny. Je větší než 1 (obvykle se pohybuje v rozmezí od 2 do 4,5),

Φ - je koeficient tekutosti a odpovídá smykové rychlosti při jednotkovém smykovém napětí.

Při vstřikovacím procesu prochází polymerní tavenina tzv. fontánovým tokem (Obr. 13). Materiál vstupující do formy tuhne na chladnější stěně dutiny v rostoucí vrstvě. Pod touto vrstvou směrem ke středu tavenina dále teče s nenulovou rychlostí na povrchu tuhnoucí vrstvy. Jedná se tedy o časově neustálený tok polymerních tavenin. Výsledkem je parabolický tok předního rychlostního profilu. Tavenina uprostřed předního toku je kontinuálně tlačena do oblasti kanálu, kde tuhne a další materiál postupuje vpřed. Materiál, který je tlačěn na vnější stěnu vykazuje velmi nízkou smykovou rychlost, zatímco u materiálu na rozhraní kov – polymer je uvažována nulová smyková rychlost.



Obr. 13: Fontánový tok [13]

Při toku polymerních tavenin se také kromě převažujícího viskózního toku (nevratná deformace) projevuje i elastické chování (vratná deformace). Je to způsobeno tím, že zapleteniny a smyčky vytvořené makromolekulami se projevují

jako částečně fixující body a vytvářejí tzv. fyzikální uzly. Při rychle působícím zatížení pak dochází nejen k nevratnému toku, ale i k orientaci makromolekul a jejich segmentů ve směru toku, která se projevuje vznikem normálových napětí během toku, relaxací napětí po zahájení a zastavení toku a zpětným krípem po zastavení toku. Elastické projevy se během procesu vstřikování výrazně mění vlivem snižující se teploty a měnící se viskozity taveniny. Orientace se projevuje tím více, čím nižší je teplota procesu. Je-li pak polymer prudce ochlazen, orientovaný stav zamrzne. Při pozdějším ohřátí nad teplotu, při které se již může dostatečně uplatňovat Brownův pohyb, se materiál vrací do původního stavu před orientací a způsobuje změny tvaru resp. dodatečné smrštění materiálu.

2.3.2 Reologické vlastnosti polymerů [9,21,23,24,25]

Při vstřikovacím procesu působí na materiál velká normálová i smyková napětí za současných teplotních změn, což může mít za následek vznik různých vnitřních pnutí. Tato pnutí se s časem uvolňují a způsobují další změny rozměrů vstřikovaného dílu.

Vlastnosti související s molekulovou strukturou polymerů mají přímou vazbu na jejich zpracování. Na rozdíl od kovů se polymerní materiály skládají z dlouhých řetězců makromolekul, což vede ke komplexnějšímu posuzování jejich reologických vlastností. Vztah mezi elastickým smykovým napětím τ a smykovou deformací γ pro ideálně elastický materiál je vyjádřen Hooke zákonem:

$$\tau = G \cdot \gamma \quad (5)$$

kde: τ - smykové napětí [$\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$]
 G - modul pružnosti ve smyku [Pa]
 γ - smyková deformaci.

U ideálně viskózní kapaliny je deformace závislá na čase a vztah mezi smykovým napětím τ a smykovou rychlostí $\dot{\gamma}$ je určen Newtonovým zákonem:

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (6)$$

kde: η - dynamická viskozita [$\text{Pa} \cdot \text{s}$]
 $\dot{\gamma}$ - smyková rychlost [s^{-1}].

Pro Newtonovské kapaliny je hodnota viskozity materiálovou konstantou a není závislá na rychlosti deformace. Pro ideálně elastické materiály je deformace přímo úměrná napětí a je vratná (po odstranění napětí deformace vymizí), pokud napětí nepřekročí mez plastické (trvalé) deformace. U ideálně viskózních kapalin je veškerá energie disipována v kontinuální deformaci, která není vratná a je zpožděná proti působícímu napětí.

Polymerní taveniny se pod vlivem mechanického namáhání nacházejí mezi hookeovskou elasticitou a viskózní newtonovskou kapalinou. Takové látky jsou nazývány viskoelastické a na vložené napětí reagují vždy s určitým zpožděním. Jejich viskozita není konstantní a vztah mezi napětím a deformací je nelineární. Nenewtonovské chování polymerních tavenin je způsobeno vzájemným uspořádáním řetězců v konkrétním polymerním systému: Polymery se skládají z dlouhých molekulových řetězců, které jsou do sebe vzájemně zapleteny a vytváří flexibilní „klouby“. To umožňuje různé konformace molekul rotací podél páteřního řetězce a způsobuje elastické chování polymerních tavenin.

Na základě teorie lineární viskoelasticity lze zjednodušeně popsat chování polymerů pomocí reologických modelů, vyjadřujících časové a teplotní závislosti napětí a deformace. Základní prvky modelů tvoří ocelová pružina, vyjadřující pružnou hookeovskou látku a netěsněný píst popisující ideálně viskózní kapalinu. Čím je více prvků zařazeno v modelu, tím lze lépe vystihnout reologické chování reálné polymerní taveniny. Po uvolnění působící síly je deformace pružiny plně vratná, zatímco deformace pístu je trvalá. Reologický model složený z pružiny a netěsného pístu spojených paralelně se nazývá Kelvin-Voight, sériové spojení pružiny a netěsného pístu vyjadřuje Maxwellův model. Tucketův model je konstruován sériovým spojením Kelvin-Voigtova a Maxwellova modelu.

2.3.2.1 Kelvin-Voight model

Při paralelním spojení pružiny s pístem je přechod pružiny z jednoho deformačního stavu do druhého brzděn - zpožďován viskózním prvkem. Kelvinův model se tedy deformuje vratně, ale jeho elasticita není okamžitá, nýbrž časově závislá. Je to elasticita brzděná, zpožděná. Brzděná konformační elasticita je u polymerů nejvýznamnější deformační děj. Deformace obou prvků jsou stejné a napětí přispívají aditivně k napětí celkovému.

$$\gamma_{pruž} = \gamma_{píst} = \gamma \quad (7)$$

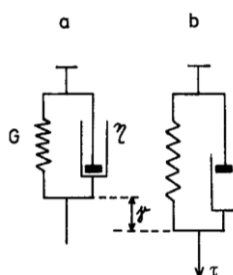
$$\tau_{pruž} + \tau_{píst} = \tau \quad (8)$$

kde τ - je celkové napětí modelu,

γ - jeho deformace.

Diferenciální rovnice Kelvin-Voightova modelu je:

$$G \cdot \gamma + \eta \cdot \frac{d\gamma}{dt} = \tau \quad (9)$$



Obr. 14: Kelvin-Voightův model, a - nedeformovaný,

b - deformovaný účinkem napětí τ [21]

Tento model popisuje kríkové vlastnosti polymerů; kríp způsobuje časově závislou deformaci materiálu při konstantním zatížení. Kelvinův model se dá použít pro určení deformačního zotavení, ale nelze jím zcela přesně popsat kríkové zotavení termoplastických tavenin. O viskoelastickém chování polymeru při kríkovém experimentu rozhoduje retardační doba krípu, definovaná jako doba, za kterou vzroste deformace na 63,2 % své konečné hodnoty.

2.3.2.2 Maxwellův model

Relaxaci lineárně viskoelastického materiálu lze popsat Maxwellovým modelem, který je tvořen hookeovskou pružinou s elastickým modulem G a netěsným pístem s kapalinou o viskozitě η spojených v sérii. Celková deformace je dána součtem deformací obou prvků, zatímco napětí zůstává stejné. Tento

model přibližuje tok komplikovaný elasticitou, nebo naopak elasticitou, která odeznívá tokem.

$$\gamma_{pruž} + \gamma_{píst} = \gamma \quad (10)$$

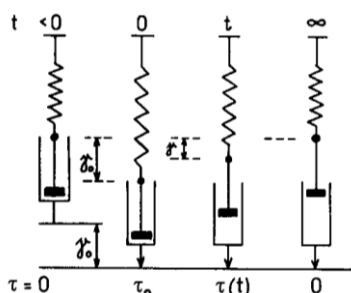
$$\tau_{pruž} = \tau_{píst} = \tau \quad (11)$$

Diferenciální rovnice Maxwellova modelu je:

$$\frac{d\tau}{dt} + \frac{\tau}{\theta} = \frac{d\gamma}{dt} \cdot G \quad (12)$$

, kde člen $\theta = \frac{\eta}{G}$ (13)

se nazývá relaxační doba.



Obr. 15: Maxwellův model [21]

Relaxační test:

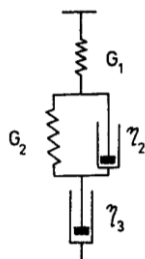
Při tomto pokusu je Maxwellův model v určitém čase zdeformován konstantní deformací ve formě skokové funkce. Tato deformace je držena po celou dobu testu. Řeší se, jak se mění napětí v prvku v závislosti na čase. Po vložení napětí reaguje pružina okamžitě, zatímco deformace pístu je nulová. Píst se tahem pružiny v čase pohybuje a deformace pružiny klesá a tím také klesá – relaxuje – napětí v modelu. Časový průběh relaxace se reálných modelů stanovuje experimentálně. Závislost napětí na čase Maxwellova modelu je vyjádřena rovnicí:

$$\tau(t) = \tau_0 \cdot e^{-t/\theta} \quad (14)$$

Pro odhad relaxace napětí se často užívá čtyřnásobek relaxační doby. Použitím tohoto vztahu v rovnici (nad odstavcem) zjistíme, že napětí zrelaxovalo na hodnotu 1,8% původní velikosti.

2.3.2.3 Tucketův model

Chování reálných polymerů lze z kvalitativního hlediska popsat Tucketovým modelem. Jde o tříparametrický model, kde pro každý parametr lze uvažovat tři deformační mechanismy lineárního amorfního polymeru – pružina vyjadřuje hookeovskou ideálně elastickou deformaci valenčních úhlů, vazeb a mezimolekulových vzdáleností, píst reprezentuje ireverzibilní pohyb (plastickou deformaci) polymerních klubek (viskózní tok) a Kelvinův model, který charakterizuje zpožděnou elastickou deformaci polymerních klubek.

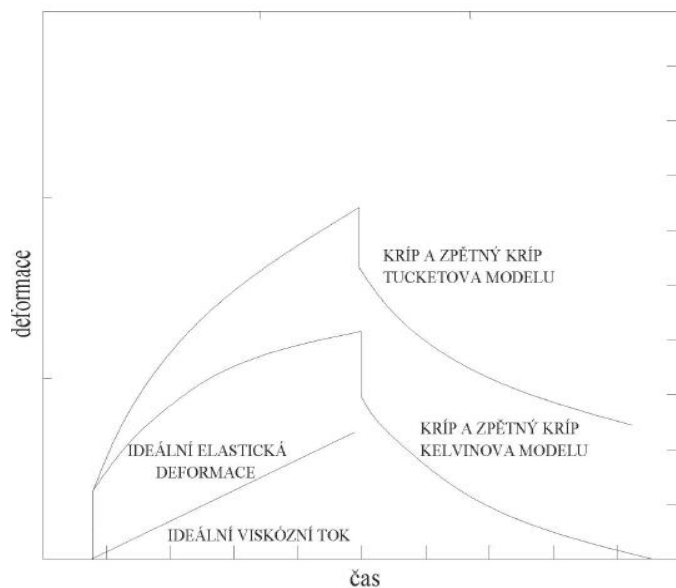


Obr. 16: Tucketův model [21]

Tucketův model je popsán rovnicí:

$$\gamma(t) = \tau_0 \cdot \left[\frac{1}{G_1} + \frac{1}{G_2} \cdot (1 - e^{-t/\theta}) + \frac{1}{\eta_3} \cdot t \right] \quad (15)$$

Na obr. 17 jsou schematicky znázorněny křivky krípu a zpětného krípu v lineární časové stupnici. Tokový prvek zapojený v Tucketově modelu se při konstantním napětí deformuje lineárně s časem. Zpětný kríp se skládá z okamžitého zotavení ideálně elastické pružiny a ze zpožděné elastické zotavení Kelvinova modelu, které dohromady dávají vratnou deformaci. Zbýlá deformace je nevratná a zvětšuje se s dobou předchozího krípu, popř. s teplotou, při které byl kríp proveden.



Obr 17: Kríp a zpětný kríp Tucketova modelu [25]

2.3.2.4 Relaxační a retardační spektrum

Přechody probíhající mezi dvěma elastickými stavy u reálných viskoelastických látek probíhají ve velice širokém časovém rozmezí, zpravidla nejméně čtyř až šesti řádů. Takové chování je možné popsat generalizovaným Maxwellovým modelem, ve kterém je k pružině paralelně připojen velký počet Maxwellových prvků, kde i -tý prvek má parametry G_i , θ_i . Relaxační modul generalizovaného modelu je součtem relaxačních modulů jednotlivých Maxwellových prvků a modulu připojené pružiny G_e .

$$G(t) = G_e + \sum_{i=1}^j G_i \cdot e^{-t/\theta_i} \quad (16)$$

Závislost G_i na θ_i se nazývá distribuce relaxačních dob nebo *relaxační spektrum*. Čím větší je počet prvků, tím lépe lze popsat naměřené závislosti. Relaxační modul je dán vztahem:

$$G(t) = G_e + \int_0^{\infty} g(\theta) \cdot e^{-t/\theta} d\theta \quad (17)$$

Retardační spektrum tvoří generalizovaný Kelvinův model. Tento model je sériové spojení pružiny s poddajností J_0 , viskózního prvku a velkého počtu Kelvinových prvků s poddajnostmi J_i a retardačními dobami θ_i . Závislost J_i na θ_i přechází s rostoucím počtem Kelvinových prvků na kontinuální distribuční funkci

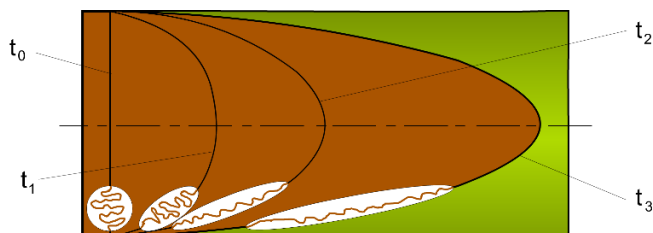
retardačních dob neboli na retardační spektrum $f(t)$. Křípová poddajnost je pak popsána vztahem:

$$J(t) = J_0 + \frac{t}{\eta} + \int_0^{\infty} f(\theta) \cdot [1 - e^{-t/\theta}] \cdot d\theta \quad (18)$$

Spektra představují úplnou charakterizaci lineárního viskoelastického chování polymeru. Spektrum se ovšem musí nejprve získat z experimentálních údajů, změřených v širokém rozmezí dob či frekvencí.

2.3.3 Orientace a anizotropie změn [8,28,29,30]

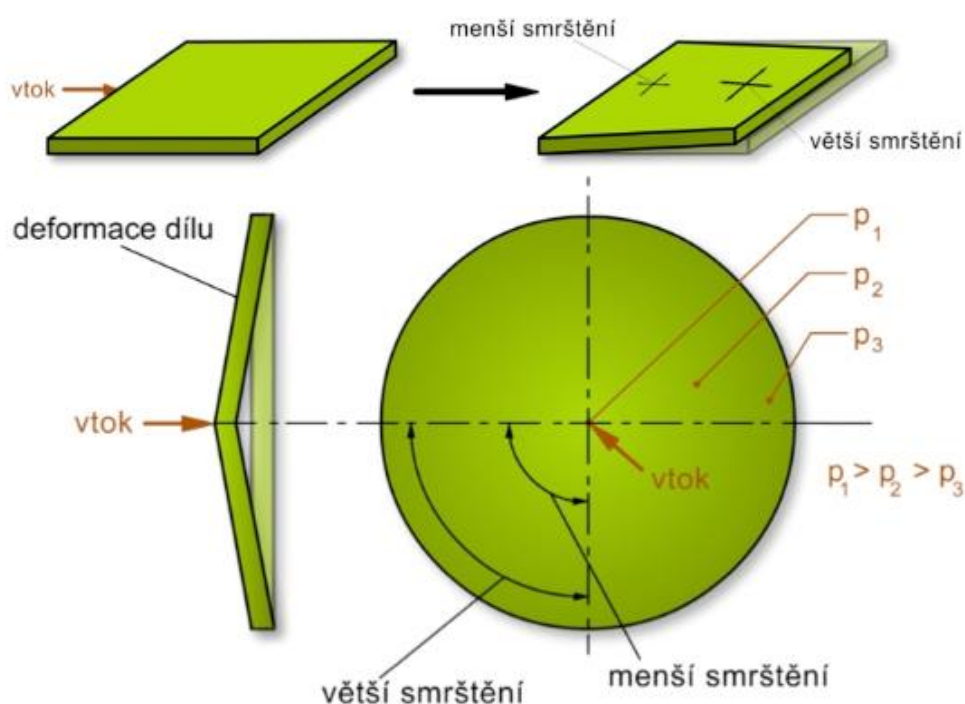
Vstřikované polymery vykazují relativně velké hodnoty smrštění, které není vždy isotropní. Anizotropie je způsobena především orientací makromolekul, případně i plniva u plastů plněných vláknitým plnivem a krystalických útvarů u semikrystalických polymerů. Během plnění formy prochází sbalené makromolekuly kanálky a průřezy ve formě a vlivem vysokých smykových napětí se natahují ve směru toku taveniny (Obr. 18). Čím více makromolekul je paralelně uspořádaných vedle sebe, tím vyšší je stupeň orientace. Přestane-li smykové napětí působit dříve než tavenina ztuhne, snaží se napřímené makromolekuly zaujmout svojí rovnovážnější (sbalenou) polohu. Orientace zvyšuje uspořádanost makromolekul, a proto se současně snižuje entropie systému. Ve hmotě tedy zůstávají zafixovány síly, které při zvyšování teploty provázené zvýšenou pohyblivostí makromolekul jsou příčinou deformací.



Obr. 18: Vliv smykové rychlosti na rozvinování makromolekul [28]

Homogenní polymery vykazují vlivem orientace makromolekul rozdíl mezi smrštěním ve směru toku taveniny (podélným) a ve směru kolmém na tok taveniny (příčným) viz. Obr. 19. Vzhledem k řadě působících vlivů nelze jednoznačně určit, které smrštění bude větší nebo menší. Větší rozdíly ve směru smrštění mají semikrystalické polymery (10-25%), amorfnní polymery menší (5-10%). Podle

studie Jansena [29] bylo ověřeno, že smrštění je většinou případů větší v příčném směru k toku taveniny, než smrštění ve směru dráhy toku a tyto rozdíly jsou závislé na vstřikovacích parametrech. V jiné studii Chang [30] porovnával anisotropii smrštění u semikrystalického a amorfního termoplastu. Bylo zjištěno, že semikrystalický termoplast HDPE vykazuje vyšší hodnoty smrštění v příčném směru, zatímco u amorfních termoplastů ABS a PS byly naměřeny vyšší hodnoty smrštění v podélném směru. Z toho lze usuzovat, že se na anisotropii smrštění významně podílí nadmolekulární struktura termoplastů.



Obr. 19: Anizotropie smrštění v důsledku orientace [28]

2.3.4 Vliv plniva na smrštění [19,31,32]

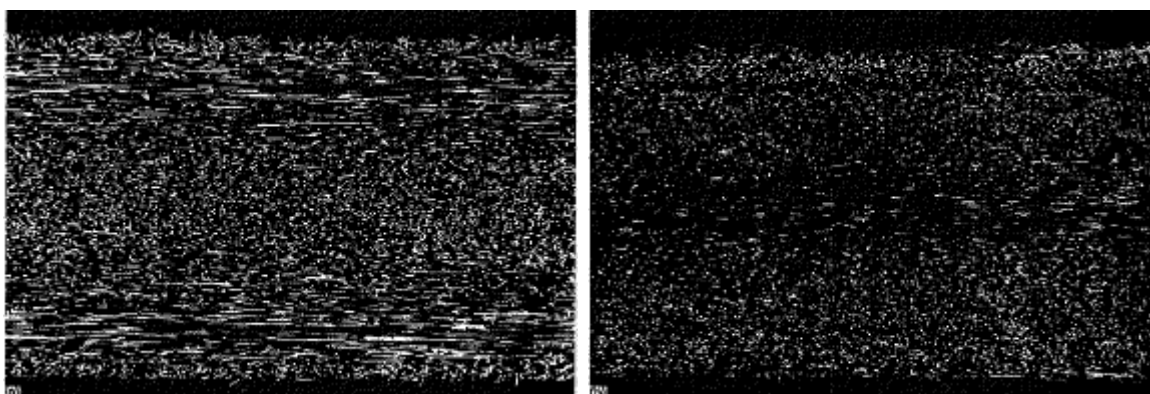
V zásadě lze uvažovat dvě důležité skupiny plniv – plniva částicová a vyztužující plniva. Plniva se plastů přidávají primárně k selektivní modifikaci mechanických vlastností původního polymeru, například k zlepšení tuhosti nebo odolnosti proti tečení. Sekundárním efektem plniv je rozdílná velikost smrštění kompozitu v porovnání se neplněným polymerem. Většina plniv je anorganických a mají nižší koeficient tepelné roztažnosti nežli plasty. Plniva se tedy v průběhu tuhnutí taveniny kompozitu smršťují méně, nežli polymerní matrice.

Do skupiny částicových plniv patří celá řada minerálních plniv (např. talek, skleněné mikrokuličky, grafit) která obecně zvyšují viskozitu taveniny, tuhost, tvrdost, tepelnou stabilitu a zmenšují smrštění nebo povrchový odpor. Redukce smrštění je přibližně proporcionální koncentraci částicového plniva. Tato skupina plniv obvykle nezpůsobuje výraznou anizotropii rozměrových změn. Většina částicových plniv má nízký charakteristický poměr (1 : 1) a hodnoty smrštění v podélném a příčném směru bývají poměrně vyrovnané. Částicová plniva mají poměrně vyrovnaný geometrický tvar a nezpůsobují tedy orientaci podle tokové dráhy. U materiálů plněných částicovým plnivem se rozdíly zmenšují a při obsahu kolem 40% plniva je smrštění téměř izotropní. Dodatečné smrštění je u neplněných polymerů větší ve směru orientace makromolekul a obecně větší, než u plněných plastů.

Vyztužující (vláknitá) plniva (např. skleněná, uhlíková vlákna) výrazně ovlivňují anizotropii i smrštění. Anizotropie smrštění polymerů vyztužených vlákny je způsobena orientací vláken, ke které dochází smykovými silami v průběhu plnění dutiny formy. Na rozdíl od makromolekul, na které působí orientační a relaxační pochody během plnění a chlazení se vlákna v polymerní matrici během tuhnutí nereorientují a zůstávají zafixovány v poloze vyvolané tokem (Obr. 20). Vyztužující plniva jsou geometricky definována poměrem délky vlákna k jeho průměru. Vlákna s poměrem délky k průměru větším než 10:1 již mají vyztužující efekt a působí jako překážky volnému průběhu tepelné kontrakce ve směru orientace vláken a tím zmenšují v tomto směru smrštění. Toto platí i ve směru kolmém na směr orientace vláken, ovšem s daleko menším vlivem na redukci smrštění. V porovnání s flexibilními molekulami polymeru mají skleněná vlákna rigidní strukturu a zaujímají určitý objem v polymerní matrici. Termoplasty plněné vláknitým plnivem vykazují smrštění menší ve směru podélném na tok taveniny o přibližně 20-60% než ve směru kolmém na tok a to dle obsahu plniva. Obsah plniva nad přibližně 25% již nemá na smrštění téměř žádný vliv. Vliv vláknitého plniva však není doposud zcela jednoznačný. Podle literatury [31] byla provedena studie, kde byla zkoumána anizotropie smrštění polypropylenu vyztuženého skleněnými vlákny a neplněného polypropylenu při tlaku v dutině formy 30 MPa. Hodnoty smrštění polymeru plněného 30 % skleněných vláken byly 0,3 % v podélném směru a 1,1 % v příčném směru s korespondujícím poměrem anisotropie 3,7. Hodnoty smrštění neplněného polypropylenu byly 1,6 %

v podélném směru a 1,9 % v příčném směru s výsledným téměř izotropickým poměrem 1,2. Podle Jansena [32] je smrštění polymerů plněných vlákny významně nižší v podélném směru, nežli v příčném a příliš se nemění s hodnotou velikosti dotlaku. Se zvyšujícím se obsahem plniva smrštění v podélném směru rovnoměrně klesá, zatímco v příčném směru nedochází k významným změnám.

Parametry, mezi které lze zahrnout vstřikovací rychlost, tloušťku tvarové dutiny, viskozitu taveniny a konstrukci vtokového systému, mají významný vliv na výslednou orientaci vláken v polymerní matici.



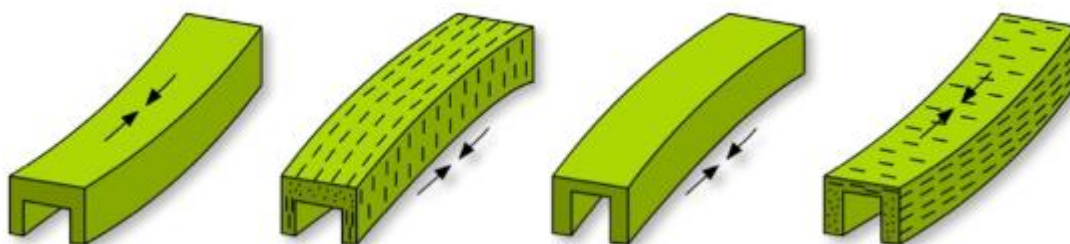
a)

b)

Obr. 20: Orientace skleněných vláken:

a) v příčném směru k tokové dráze

b) ve směru toku taveniny [19]



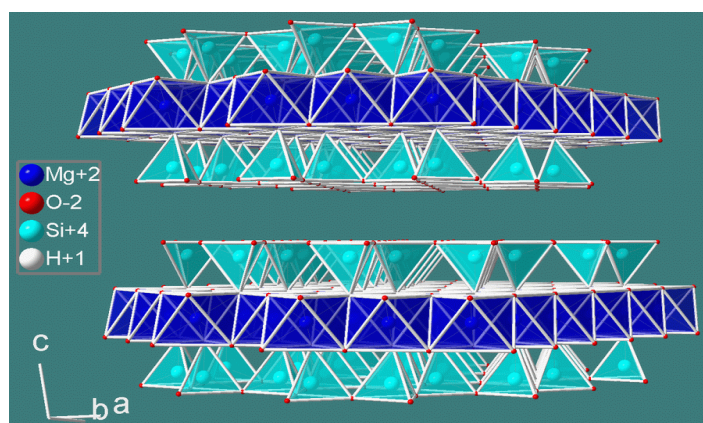
Obr. 21: Anizotropie smrštění výstřiků u neplněných a plněných materiálů [28]

Polypropylén plněný minerálním plnivem – talkem [4,5,6]

Talek je anorganické plnivo na bázi silikátů – $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$. Chemická struktura talku je znázorněna na obrázku 22. Je nehořlavý, prakticky nerozpustný ve vodě, slabých kyselinách a alkalickém prostředí. Chemická reaktivita je velmi

malá, při teplotě nad 900°C postupně ztrácí hydroxylovou skupinu. Při teplotách nad 1050°C dochází k rekrytalizaci na enstatit (bezvodý magnesium silikát). Teplota tavení talku je 1500°C.

Talek jako plnivo v termoplastické matrici v gradacích o obsahu 10%, 20%, 30%, 40% a 50% významně zvyšuje tuhost a tepelnou odolnost polypropylénu. Nižší koeficient tepelné roztažnosti $\alpha = 1,34 \cdot 10^{-5} \text{ [K}^{-1}\text{]}$ má za následek nižší smrštění. Díky zvýšení tuhosti lze při zachování integrity výstřiku snížit tloušťku stěny a tím docílit snížení materiálových nákladů. Polypropylén plněný talkem je většinou používán v aplikacích používaných v prostředí se zvýšenou teplotou, například automobilové díly umístěné v prostoru motoru nebo komponenty elektrospotřebičů.



Obr. 22: Chemická struktura talku [4]

Polypropylén plněný skleněnými vlákny [7]

Skleněná vlákna jsou nejčastěji používaným plnivem polypropylénu. Tenká skleněná vlákna mají pravidelný kruhový průřez (\varnothing 3,5 – 24 μm). Polymery jsou nejčastěji plněny skleněnými vlákny z bezalkalické skloviny označované jako E-vlákna nebo vlákna ze skloviny s vyšším obsahem SiO_2 , MgO a Al_2O_3 . Tato vlákna mají o 40 – 60 % vyšší pevnost a označují se jako S-sklovina.

Obsah výztuže se pohybuje mezi 15 – 50 hmotnostních procent. Při obsahu nad 50 % je obtížné rovnoměrné smáčení. Zvyšující se procentuální podíl vláken v matrici působí velmi abrazivně a dochází k opotřebování nástroje a vstřikovací komory stroje. Z hlediska mechanických hodnot s rostoucím obsahem skleněného

plniva vzrůstá modul pružnosti. V případě rázové houževnatosti a pevnosti toto platí přibližně do 40 % hmotnostního obsahu.

Pro vyztužení jsou používána buď krátká, nebo dlouhá vlákna. Krátká vlákna mají délky $\sim 0,2$ mm a především vyztužují a zesilují matrici při vstřikování. Výsledný kompozit má vyšší modul pružnosti a zvýšenou teplotní odolnost oproti homopolymeru. Při vstřikování se ukládají ve směru toku taveniny a mají za následek anizotropii. Dlouhá vlákna (až do 25 mm) vytvářejí trojrozměrnou strukturu což má zásadní vliv na výsledné vlastnosti dílu, především na potlačení anizotropie smrštění a zvýšení rozměrové stability, rázové houževnatosti a tepelné odolnosti

Vnitřní pnutí [8,28]

Pnutí ovlivňuje pevností a deformační chování plastového dílu vlivem nerovnoměrných objemových změn a teplotně-tlakových procesů provázející vstřikování plastů a vzniká v průběhu solidifikace taveniny, nebo při dodatečných technologických úpravách. Pnutí lze do určité míry eliminovat řízením vstřikovacího procesu, avšak nelze se mu zcela vyhnout. Vzniklá pnutí mají signifikantní vliv na deformační chování plastových dílu a tím i na smrštění. Podle příčin vzniku lze pnutí rozlišovat na ochlazovací, orientační, expanzní a krystalizační.

Ochlazovací pnutí vzniká v důsledku nerovnoměrného ochlazování různých částí vstřikovaného dílu. V jádru stěny probíhá ochlazování pomaleji a smršťování je větší, ale nemůže se plně uplatnit, protože mu v tom brání ztuhlá povrchová vrstva, kde je ochlazování prudké a smrštění malé. Dochází tedy k nerovnoměrnému smršťování jednotlivých vrstev vstřikovaného dílu a vzniku pnutí. Na Obr. 23 lze pozorovat průběh ochlazovacího pnutí, kde po ztuhnutí celého průřezu je v povrchové vrstvě tlakové pnutí a v jádru stěny tahové. Tahové pnutí vzniká kolem kovových zástříků důsledkem rozdílné teplotní roztažnosti kovu a plastu a také smršťováním plastu. Tlakové pnutí se objevuje na vnějších plochách ohybu u hranatých dílu, kde dochází k intenzivnějšímu ochlazování stykem s chladnější stěnou formy, na vnitřní straně ohybu naopak vzniká tahové pnutí.

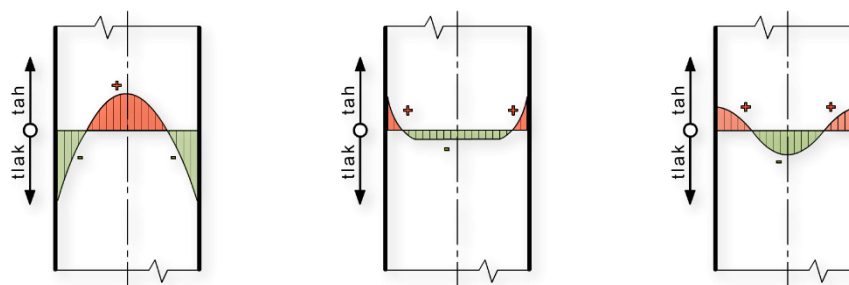
Orientační pnutí vzniká důsledkem rozdílné orientace makromolekul a nestejně teplotní roztažnosti různě orientovaných oblastí výstřiku. Tato pnutí jsou

dostí velká a mohou vést k dodatečným nepravidelným deformacím nebo trhlinám. Tahové pnutí vzniká v oblastech s vysokým stupněm orientace, tlakové v oblastech s nižším stupněm orientace makromolekul. Pnutí klesá s vyšší teplotou taveniny a formy a nižším vstřikovacím tlakem.

Expanzní pnutí se projevuje při otevření formy, je-li plastový díl v tvarové dutině ještě pod tlakem, např. následkem pružné deformace formy způsobené nadměrným vstřikovacím tlakem. Po vyjmutí dílu z formy mají vnitřní, ne zcela ztuhlé, vrstvy snahu expandovat, ovšem této expanzi je bráněno tuhými a již pevnými povrchovými vrstvami. Vniká tahové pnutí v povrchové vrstvě a tlakové pnutí v jádru vstřikovaného dílu. U křehkých plastů pak mohou vznikat trhlinky na povrchu dílu ve směru orientace.

Pnutí vlivem efektu proudění - Čelo proudu taveniny je při plnění formy tvořeno chladnější viscoelastickou povrchovou vrstvou, která se napíná a vzniká v ní biaxiální orientace a biaxiální tahové napětí vzhledem ostatním méně orientovaným vrstvám. Jakmile tato vrstva přilehne na stěnu formy a ztuhne ve stavu napjatosti, dojde ke vzniku špičky tahového pnutí na povrchu dílu.

Krystalizační pnutí vzniká pouze u semikrystalických polymerů vlivem rozdílného smršťování oblastí s různým podílem krystalické fáze a dodatečné krystalizace. Toto pnutí bývá menší než orientační.



Obr. 23 : Průběh tří druhů vnitřních pnutí napříč stěnou výstřiku [33]

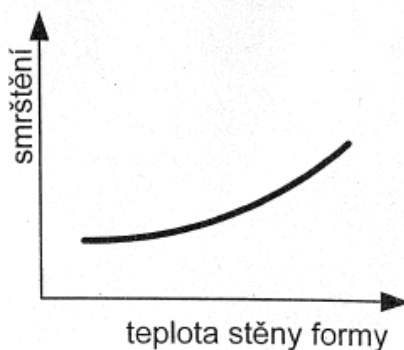
a) ochlazovací pnutí b) pnutí vlivem efektu proudění c) expanzní pnutí

2.3.5 Vliv technologických parametrů na smrštění [19,34,37]

Procesní parametry mají významný vliv na smrštění termoplastů. Teplota taveniny, vstřikovací rychlost, vstřikovací tlak, dotlak a doba dotlaku, teplota formy a teplota při odformování ovlivňují výsledné rozměry výstřiku. Vliv těchto

parametrů na smrštění nezávisí jen na vzájemné interakci mezi sebou, ale také na materiálu, konstrukci výrobku a formy.

Teplota formy – teplota formy ovlivňuje rychlost chladnutí. Čím rychleji se polymer ochlazuje, tím mají molekuly méně času k uspořádání a tím méně se výrobek smršťuje (Obr. 24). Krystalické polymery potřebují určitou dobu k přeuspořádání molekul do krystalické struktury. Podobně probíhá relaxace napětí u amorfních polymerů, pokud chladnou pomalu. Tím vzniká vyšší uspořádanost a probíhá relaxace napětí, což způsobuje vyšší hustotu materiálu a vyšší smrštění. Obecně lze konstatovat, že nízká teplota vyvolá vysoký gradient chlazení a je příčinou nízkého smrštění, ovšem většího dosmrštění. Vysoká teplota způsobí vysoký stupeň krystalizace a tím velké smrštění, dosmrštění je malé.

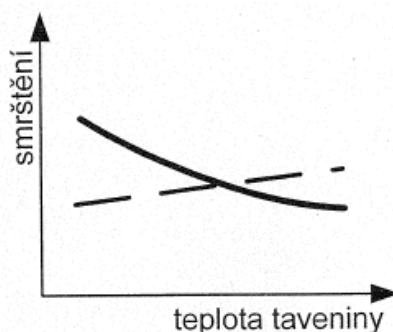


Obr. 24: Vliv teploty stěny formy na smrštění [34]

Teplota taveniny – vliv teploty taveniny je nejednoznačný. Z hlediska smrštění lze pozorovat dva protichůdné efekty: - zvýšení teploty taveniny zvyšuje tepelnou kontrakci a tím i smrštění - zvýšení teploty taveniny snižuje její viskozitu a tím umožňuje vyšší tlakovou odezvu v dutině formy při dotlaku, což vede ke zmenšení smrštění (Obr. 25). Obvykle je působení dotlaku výraznější než tepelná kontrakce, nicméně v některých případech- konstrukce výstřiku, nízký dotlak, umístění vtoku tomu tak být nemusí.

Při vysokých teplotách taveniny dochází k výraznému smrštění způsobeném teplotní změnou. Jádro taveniny je v momentě zatuhnutí vtokového ústí teplejší, nežli vrstvy směrem ke stěně formy. Extrémně vysoká teplota taveniny může způsobit, že je dotlaková fáze ukončena ještě před zatuhnutím vtoku. K tomuto případu může dojít, je-li zvýšena teplota taveniny bez zvýšení doby dotlaku. Jak vysoká teplota taveniny, tak pravděpodobnost opožděného zatuhnutí vtoku

způsobují zvýšení smrštění. Je třeba nalézt nějakou střední hodnotu, kde je viskozita taveniny v rovnováze s tlakem uvnitř dutiny formy a dojde k ideálnímu naplnění a průběhu dotlaku. V tomto bodě je smrštění díky teplotě taveniny na minimu.



Obr. 25 : Vliv teploty taveniny na smrštění [34]

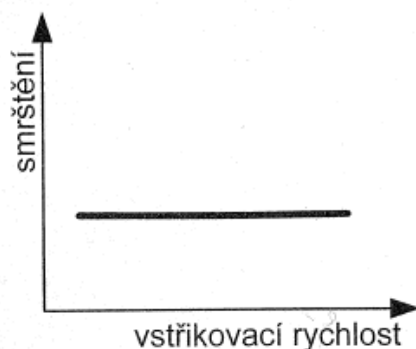
Vstřikovací rychlost – vliv vstřikovací rychlosti je nejednoznačný podobně jako vliv teploty taveniny (obr. 26). Vyšší vstřikovací rychlost způsobuje sekundární zvyšování teploty taveniny vlivem vysokého smykového napětí a tím vyšší tlakovou odezvu v dutině formy. Frikční teplo vzniká restrikcemi ve vtoku a mezi tekoucím materiálem ve středu výstřiku a již ztuhlým materiálem u stěn formy. To může způsobit významný nárůst teploty, především v oblasti vtokového ústí, v závislosti na tlaku a vstřikovací rychlosti. Proti tomu však působí efekty orientace a reorientace, rozdělení vnitřního pnutí a nekonstantní viskozita. Studie Zollnera [35] popisuje teplotní špičku naměřenou na rozhraní mezi ztuhlým materiálem u stěny dutiny formy a pohybující se taveninou ve středu tloušťky vstřikovaného dílu.

Je-li vstřikovací rychlost příliš nízká, materiál začíná tuhnout dřív, než je dutina zcela naplněna a to vyvolává potřebu vyššího tlaku k úplnému naplnění dutiny formy. Velmi pomalé plnění potlačuje účinnost dotlaku, protože materiál během plnění rychle tuhne a dochází k rychlému zatuhnutí vtoku po objemovém naplnění dutiny. To má za následek vyšší smrštění. Jiný pohled nabízí následující úvaha - nízká vstřikovací rychlost vyvolává potřebu zvýšení teploty taveniny k dosažení naplnění tvarové dutiny formy, což může zlepšit tlakovou odezvu a dochází ke zmenšení smrštění.

Je-li dutina formy plněna příliš rychle, dochází při průchodu taveniny vtokem k nadměrnému tlakovému poklesu a je nutno zvyšovat hodnoty vstřikovacího

tlaku. Tím dochází k nadměrnému zvyšování teploty taveniny oproti hodnotě při optimální vstřikovací rychlosti a tím i k zvětšení smrštění. Optimální hodnoty vstřikovací rychlosti by se měly pohybovat blízko minimálních hodnot vstřikovacího tlaku. Vhodná vstřikovací rychlost pro konkrétní díl je závislá na jeho geometrii, velikosti a umístění vtoku, teplotě formy a taveniny. Vyšších hodnot vstřikovací rychlosti se někdy používá k dosažení lepšího povrchu dílu – především u pohledových dílů.

Vhodná kombinace optimálně nastavené vstřikovací rychlosti a teploty formy může v některých případech potlačit určité deformace vstřikovaných dílů. V případě silnostěnných výstřiků a konstrukčním řešením formy s relativně malým vtokem lze zvýšením vstřikovací rychlosti prodloužit dobu solidifikace vtokového ústí.



Obr. 26 : Vliv vstřikovací rychlosti na smrštění [34]

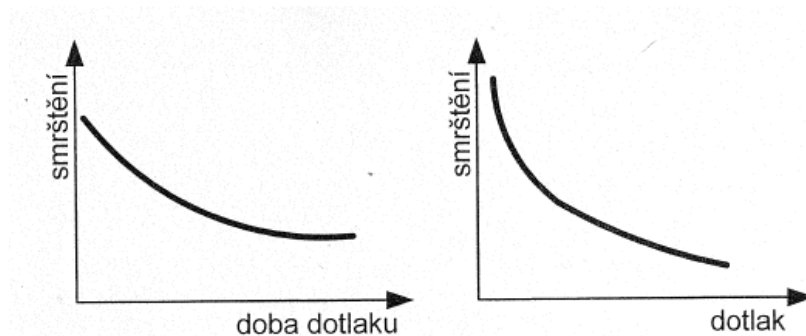
Vstřikovací tlak – Vstřikovací tlak musí být dostatečně velký, aby došlo k naplnění dutiny formy. Jeho hodnoty se pohybují v rozmezí 70 – 110 MPa. Vyšší vstřikovací tlak snižuje průměrnou hodnotu smrštění. Maximální hodnota vstřikovacího tlaku může být limitována uzavírací silou vstřikovacího stroje, protože skutečný tlak v dutině formy násobený projektovanou vstřikovaného dílu nesmí překročit uzavírací sílu. Nadměrný vstřikovací tlak může způsobit otevření formy a přestřiky v dělicí rovině, nebo dokonce poničit tvarové části formy.

Průběh tlaku ve formě obvykle vykazuje rozdíly mezi místem u vtokového ústí, kde je tlak nejvyšší a u posledního bodu plnění, kde je nejnižší. To má zásadní vliv i na smrštění v různých vzdálenostech od vtokového ústí. Rozdíly tlakového profilu klesají se zvyšující se tloušťkou dílu, vstřikovacím tlakem a velikostí dotlaku, vstřikovací rychlostí a se snižující se viskozitou materiálu. Tavenina obvykle tuhne nejdříve v nejvzdálenějším místě od vtoku. Frikční teplo generované průchodem

skrže vtok udržuje materiál nejteplejší v oblasti vtokového ústí, kde tavenina tuhne nejdéle. Materiál v této oblasti vykazuje nižší hodnoty smrštění díky delšímu působení tlaku. Rozdíly ve smrštění v jednotlivých místech dílu jsou způsobeny rozdíly v tlaku v dutině formy.

Dotlak má rozhodující vliv na kompenzaci smrštění a hmotnost výstřiku. U klasických vtokových soustav existuje nepřímá úměra mezi hmotností a smrštěním, kdy se stoupající velikostí a dobou dotlaku roste hmotnost a klesá smrštění (Obr. 27). Čím vyšší je tlak v dutině formy při zamrznutí vtoku, tím vyšší je tlaková odezva ve výstřiku a tím je smrštění menší. Podle experimentu provedeného Santisem a kol. [36] na obdélníkové destičce z polypropylénu klesá výrobní smrštění se zvyšující se hodnotou a dobou dotlaku. Tlak ve výstřiku není stejný, ale liší se vzdáleností od místa vtoku. Maximální hodnota je poblíž vtoku a se zvětšující se vzdáleností od ústí klesá. Tlakový rozdíl mezi vtokovým ústím a koncem toku může mít významný vliv zejména pro dlouhé dráhy toku, nebo tenkostěnné díly. Tento rozdíl v tlakové historii, který nastává během cyklu, způsobuje, že smrštění vzrůstá směrem ke konci toku.

Doba dotlaku má za cíl dopravit do chladnoucího výstřiku takové množství taveniny, která působí proti objemové kontrakci, jak se snižuje teplota výstřiku, aby došlo ke kompenzaci smrštění. Čím delší je reálná doba působení dotlaku, tím je menší smrštění (obr. 28).

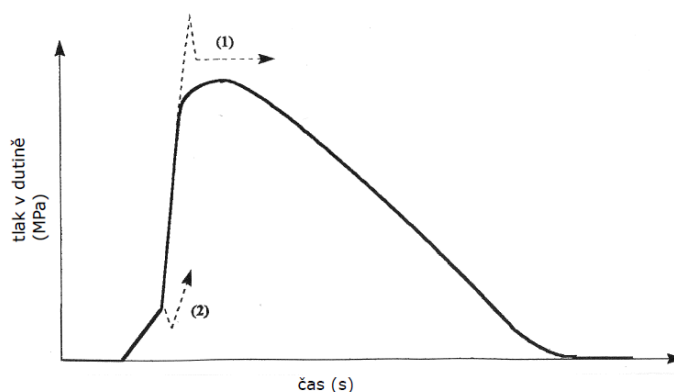


Obr. 27 : Vliv velikosti a doby dotlaku na smrštění [34]

Velikost dotlaku

Velikost dotlaku je závislá na ztrátě statického tlaku v dutině formy mezi pozicí u vtokového ústí a nejvíce vzdáleném místě od vtoku- v závislosti na délce dráhy toku budou tlakové ztráty větší u vtokového ústí nežli na opačném konci. Velikost dotlaku je závislá tlakovém přenosu podél tokové dráhy v souladu s geometrií dílu

a teplotě taveniny a formy. Dotlak je limitován bodem, kdy začíná docházet k přeplňování, tedy nad maximální přípustný tlak v dutině formy. Tento bod určuje ideální, nebo kritickou úroveň velikosti dotlaku. Nad kritickou úrovní hladiny dotlaku v dutině formy obecně dochází ke zvyšování hmotnosti dílu a především ke zvětšení tloušťky stěny dokud nedojde k překonání uzavírací síly, pootevření formy a vzniku přestřiků. Je tedy nezbytné vyhnout se při nastavování technologických parametrů překonání kritické úrovně velikosti dotlaku. Na Obr. 28 jsou znázorněny mezní tlakové profily v dutině formy v relaci s dotlakem. Naznačený průběh křivky 1 znázorňuje přeplnění, zatímco křivka 2 ukazuje nedostatečný dotlak. Plná čára pak naznačuje ideální průběh dotlaku. Takový průběh tlaku zaručuje, že buď dojde k eliminaci zpětnému toku taveniny do komory vstřikovacího stroje, nebo pouze ve velmi malé míře. Požadovaná doba dotlaku a bod zatuhnutí vtokového ústí jsou závislé na velikosti dotlaku, tedy vysoké hodnoty úrovně dotlaku vedou k delšímu časovému intervalu, po kterou dotlak působí. K určení okamžiku zatuhnutí vtokového ústí se buď používá metody sledování hmotnosti výstřiku při postupně zvyšujících se dobách dotlaku nebo se vyhodnocuje průběh tlaku pomocí tlakových čidel umístěných v dutině formy. Jestliže je doba dotlaku kratší, než je doba potřebná k zatuhnutí vtoku, bude na tlakovém profilu patrný zlom, dojde k vyrovnání tlaku a zpětnému toku taveniny skrze vtok před čelo šneku. Jak se tavenina vrací zpět z dutiny formy, dochází k přerušení chladnutí.



Obr. 28 : Mezní tlakové profily v dutině formy v relaci s dotlakem

2.3.6 p-v-T charakteristiky polymerů [19,33,42]

Termální expanze a kontrakce, p-v-T chování a tepelné vlastnosti jsou charakteristickými atributy polymerů. Smrštění a deformace nejsou materiálovými konstantami polymerů, jejich hodnoty jsou závislé na tepelné a tlakové historii,

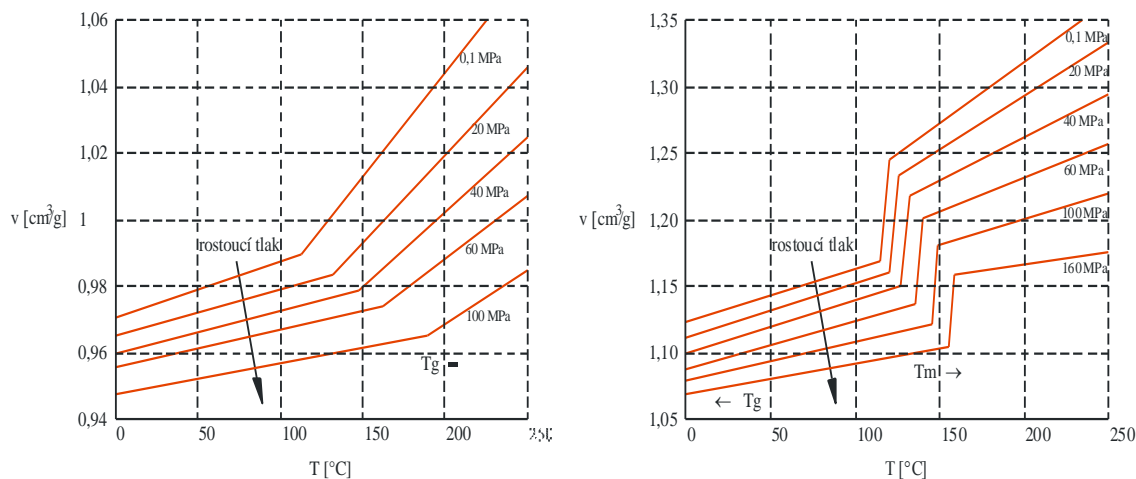
kterou polymer prošel během vstřikování. Smrštění a deformace záleží na vlastnostech materiálu (p-v-T, tepelné vlastnosti, atd.), na tvaru výrobku a konstrukci nástroje (tloušťka stěn, umístění vtoku, atd.) a procesních parametrech (teplota, tlak, rychlost vstřikování, atd.) Vzhledem ke komplexnosti vlivů, je nezbytné uvažovat materiál, konstrukci výrobku a procesní parametry jako celek.

Diagram p-v-T (tlak-měrný objem-teplota) ukazuje vzájemnou závislost tří hlavních stavových veličin daného typu polymeru. Procesní parametry jako je vstřikovací tlak a dotlak mají významný vliv na rozměry výstřiku a tedy i smrštění. Na rozdíl od amorfních plastů jsou p-v-T diagramy semikrystalických termoplastů složitější. U semikrystalických termoplastů je objemové smrštění větší než u amorfních v důsledku dalšího smrštění způsobené krystalizací. Při krystalizační teplotě T_m nastává zlom izobar. U amorfního termoplastu nastává ohyb izobary v oblasti teploty skelného přechodu T_g , zatímco u semikrystalického se izobary lomí při teplotě tavení krystalů T_m . Tento rozdíl v p-v-T charakteristikách mezi amorfním a semikrystalickým polymerem má následný významný dopad na řízení procesu vstřikování plastů. Během solidifikace taveniny nastává:

- u amorfních polymerů velikost dotlaku postupně klesá, zatímco u semikrystalických je udržována konstantní velikost
- u amorfních polymerů se tok taveniny skrze vtokové ústí zastavuje, zatímco u semikrystalických pokračuje do ukončení krystalizace. To sebou nese rozdílné nároky na konstrukci vstřikovaného dílu a vtokového systému.

Při používání p-v-T diagramů je nutné si uvědomit, že nezahrnují funkci času, tzn., že není brát zřetel na gradient chlazení, který je významný především u krystalických polymerů. Dále není brána v úvahu tlaková historie v různých bodech výstřiku - čím vyšší tlak (blíže u ústí vtoku) tím menší smrštění, tloušťka výstřiku.

Teoreticky lze p-v-T diagramy užít k predikci objemového smrštění, pokud jsou známy p-v-T hodnoty konkrétních termoplastů a rovněž procesní parametry. V praxi se však přesné procesní podmínky v dutině formy zjišťují komplikovaně, nicméně p-v-T diagramy lze užít lepší představě, jak jednotlivé fáze vstřikování ovlivňují objemové smrštění. Pro vyhodnocení se používá jednoduchý záznam série křivek získaných měření specifického objemu a teploty při různém tlaku.



Obr. 29: Porovnání p - v - T diagramů vypočtených podle van der Waalsovi rovnice pro amorfní termoplast vlevo (PS) a semikrystalický termoplast vpravo (PP) [33]

Plasty mají kladný koeficient tepelné roztažnosti a jsou vysoce stlačitelné v roztaveném stavu. Důsledkem je, že objem materiálu se mění jak s teplotou, tak i tlakem. Vzájemný vztah stavových veličin v p - v - T lze popsat Van der Waalsovou modifikovanou stavovou rovnicí:

$$(p + \pi) \cdot (v - \omega) = R \cdot T \quad (19)$$

kde p [MPa] - vnější tlak,
 π [MPa] - vnitřní tlak vznikající jako důsledek vnitřních sil ve hmotě,
 v [m³.kg⁻¹] - měrný objem polymeru,
 ω [m³.kg⁻¹] - měrný objem polymeru při 0K,
 T [K] - termodynamická teplota,
 R [kJ.(kg.K)⁻¹] - materiálová konstanta polymeru obdobná individuální plynové konstantě.

Z rovnice je patrné, že tlak, teplota a specifický objem jsou na sobě navzájem závislé, to znamená, že jednotlivým hodnotám tlaku a teploty odpovídá určitý specifický objem. Hodnoty tlaku, teploty a objemu jsou popsány v dvourozměrném grafu, udávajícím specifický objem jako funkci teploty při různých hodnotách konstantního tlaku (izobar). K určení hodnot výše uvedených konstant je nutno vědět, ve které teplotní oblasti se polymer právě nachází: u amorfních polymerů je to oblast pod T_g a nad T_g , u semikrystalických oblast pod T_g , pak oblast nad T_g až do teploty asi 40 °C pod T_m , další oblastí je rozmezí teplot 40 °C pod T_m až k hranici T_m a poslední oblastí je teplotní pásmo nad T_m .

Vzhledem k ostrým zlomům izobar v p - v - T charakteristikách nepopisuje van der Waalsova rovnice přesně reálný stav. Vhodnější matematický popis nabízí

Taitova rovnice, kde jsou přímky izobar mírně zaobleny, čímž více odpovídají skutečnosti. Tento matematický popis je využíván simulačními programy (CAE) pro modelování chování polymeru během zpracování. Rovnice má tvar:

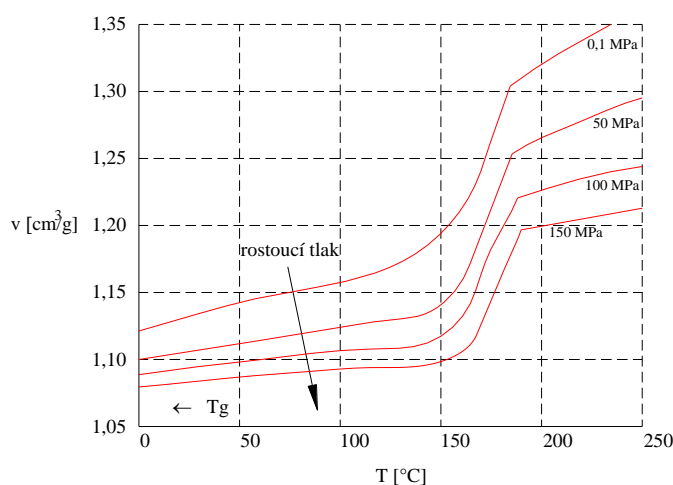
$$v(T, p) = v_0(T) \left\{ 1 - C \cdot \ln \left(1 + \frac{p}{B(T)} \right) \right\} + v_1(T, p) \quad (20)$$

dále platí:

$$\left. \begin{aligned} v_0(T) &= b_{1m} + b_{2m} \cdot \bar{T} \\ B(T) &= b_{3m} \cdot e^{-b_{4m} \cdot \bar{T}} \\ v_1(T, p) &= 0 \end{aligned} \right\} \text{pro } T > T_{př} \quad (21)$$

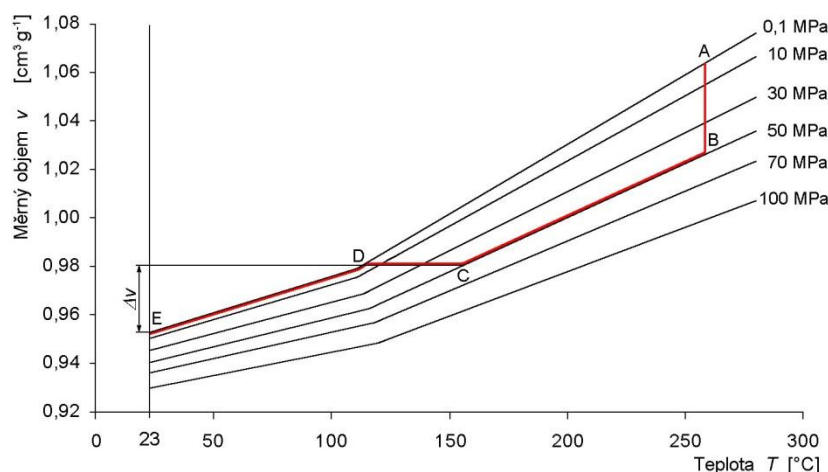
$$\left. \begin{aligned} v_0(T) &= b_{1s} + b_{2s} \cdot \bar{T} \\ B(T) &= b_{3s} \cdot e^{-b_{4s} \cdot \bar{T}} \\ v_1(T, p) &= b_7 \cdot e^{(b_8 \cdot \bar{T} - b_9 \cdot p)} \end{aligned} \right\} \text{pro } T < T_{př} \quad (22)$$

kde p [Pa] značí tlak,
 v [m³·kg⁻¹] měrný objem polymeru,
 T [K] je termodynamická teplota,
 $T_{př} = b_5 + b_6 \cdot p$ je přechodová teplota,
 $\bar{T} = T - b_5$, $C = 0,0894$ je univerzální konstanta
 b_i jsou materiálové konstanty pro daný polymer zjistitelné z příslušných materiálových listů.



Obr. 30: Diagram p - v - T pro polypropylén vycházející z Taitovy rovnice [33]

2.3.7 Proces vstřikování v p-v-T diagramu a odhad smrštění [33]



Obr. 31: Schématické znázornění vstřikovacího cyklu v p-v-T diagramu [33]

Pro popis průběhu procesu vstřikování v p-v-T diagramu je pro jednoduchost použit schématický diagram (izobarický a izotermický proces, ztuhnutí v celém objemu výstřiku) amorfního polymeru ABS (Obr. 31). Červená čára ukazuje průběh změn během vstřikovacího procesu. Úsek A-B znázorňuje vstřikovací fázi při konstantní teplotě. Tlak se zvyšuje z atmosférického na vstřikovací. V Úseku B-C je výstřik pod konstantním tlakem a postupně chladne. Po dokončení dotlačové fáze (zatuhnutí vtoku) v bodě C pokračuje chlazení při konstantním objemu. Jeho velikost je dána vztahem:

$$V_f = m \cdot v_c, \quad (23)$$

kde: v_c - měrný objem v bodě C,
 m - hmotnost výstřiku

Mezi body C-D se výstřik dále ochlazuje a tlak postupně klesá až na hodnotu atmosférického. Po otevření formy výstřik dále chladne a jeho měrný objem se podle čáry D-E zmenšuje. Tento úsek představuje největší zmenšení měrného objemu výstřiku od otevření formy až do ochlazení na okolní teplotu – bod E. Objem výstřiku V_E v bodě E je dán vztahem:

$$V_E = m \cdot v_E, \quad (24)$$

kde: v_E - měrný objem v bodě E
 m - hmotnost výstřiku

Velikost objemového smrštění je dána vztahem:

$$S_V = \frac{V_f - V_v}{V_f} \cdot 100 \quad (25)$$

kde V_f – objem dutiny formy při 23°C [m³],

V_v – objem výstřiku při 23°C [m³].

Po dosazení objemů výstřiků v bodě C a E do rovnice 17 získáme tento vztah pro objemové smrštění:

$$S_V = \frac{v_C \cdot m - v_E \cdot m}{v_C \cdot m} \cdot 100 = \frac{v_C - v_E}{v_C} \cdot 100 \quad (26)$$

Hodnoty jednotlivých měrných objemů se získávají odečtem z p-v-T diagramů. Vzhledem k tomu, že v praxi se častěji používají délkové rozměry, lze z objemového smrštění přepočtem získat hodnoty lineárního smrštění. Poměr mezi lineárním a objemovým smrštěním je 1:3.

Vztah pro přepočet je:

$$S_L = \left(1 - \sqrt[3]{1 - (S_V/100)}\right) \cdot 100 \quad (27)$$

kde S_L – lineární (délkové) smrštění [%],

S_V – objemové smrštění [%].

Tímto postupem je možno predikovat smrštění pro amorfní polymery. Lze ho použít i pro semikrystalické polymery, ovšem kvůli obtížnému stanovení bodu C na zlomu izobar odpovídajícímu teplotě tání T_m může být výsledek značně zkreslený.

2.3.8 Průběh tlaku v dutině [19,45,46]

Jednou z nejdůležitějších procesních funkcí při vstřikování rozměrově přesných dílů je tlaková historie uvnitř dutiny formy. Efektivní tlak v dutině se mění s homogenitou a teplotou taveniny a teplotou formy. Aby bylo dosaženo stejných hodnot smrštění v sériové výrobě, je třeba udržet jednotný tlakový profil v každém vstřikovacím cyklu. V praxi se často vyskytují problémy spojené se zajištěním reprodukovatelnosti výroby. Tlak nastavený na vstřikovací stroji se může vlivem jeho opotřebení měnit, nebo může kolísat teplota hydraulického oleje.

Konfigurace (tvar a rozměry) vstřikovaného dílu je úzce spjata s termomechanickou historií materiálu v dutině formy během vstřikovacího cyklu, geometrií dutiny a vtoku, fyzikálními vlastnostmi (zejména koeficientem tepelné expanze a stlačitelností) polymeru a podmínkami prostředí a namáhání dílu po dobu jeho životnosti. Konfiguraci dílu lze rozdělit na dva hlavní atributy:

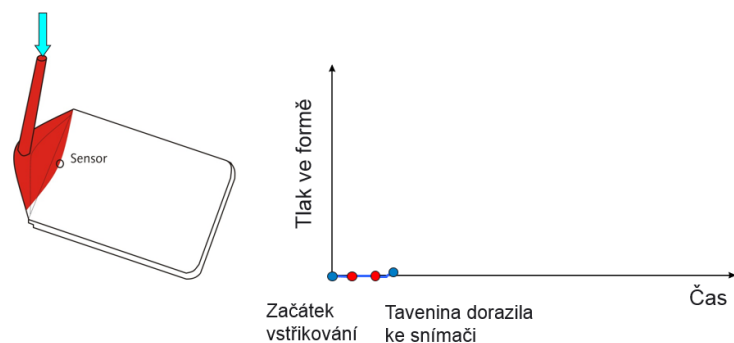
- konfigurace v dutině formy (rozměrovou integritu)
- konfigurační změny v průběhu času (rozměrová stabilita)

Rozměrová integrita dílu je určována stavem polymeru v dutině formy těsně před otevřením formy, náhlými změnami tlaku a napětí před vyjmutím z formy a následným ochlazováním dílu na okolní teplotu po vyjmutí z formy. Konečná konfigurace vstřikovaného dílu je závislá na několika odlišných faktorech, které jsou však spolu úzce svázány. Tyto faktory zahrnují tlakovou a teplotní historii v dutině formy, teplotní napětí, deformaci a smrštění.

Tlak v dutině formy (tlaková historie) během vstřikovacího procesu je úzce spjat s procesními parametry (např. vstřikovací tlak, velikost dotlaku, vstřikovací dávka, vstřikovací rychlost, teplota taveniny), avšak jeho časový průběh závisí na geometrii dutiny, teplotní historii polymeru v dutině formy a koeficientu tepelné expanze a stlačitelnosti polymeru.

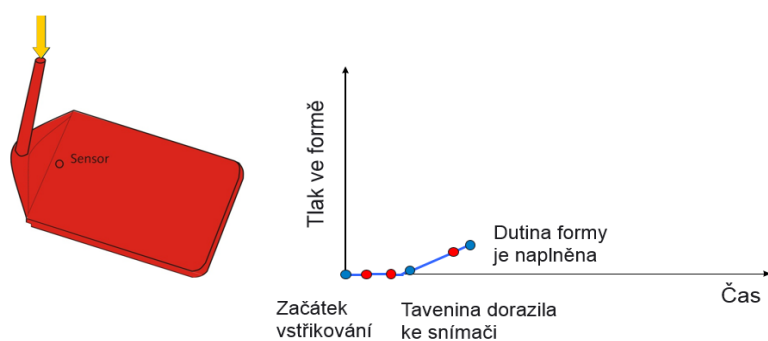
Následující obrázky 32 – 35 ukazují typický průběh tlaku v dutině formy při vstřikovacím cyklu. Cyklus lze rozdělit do dvou fází: 1- plnicí fází, která je řízena hydrodynamickými vlastnostmi taveniny proudící do dutiny formy při vstřikování; 2- dotlakovou fází, která nastává po úplném naplnění dutiny a která je řízena přestupem tepla uvnitř dutiny formy a stlačitelností tuhnoucí taveniny. Na začátku vstřikovacího cyklu je tlak v dutině formy nulový, dokud tavenina nedosáhne k tlakovému čidlu. Následně probíhá objemové plnění dutiny formy a tlak postupně roste s pohybem čela taveniny přes čidlo. Jakmile je dutina zcela naplněná, přepne se vstřikovací tlak na dotlak. Při nevhodně stanoveném bodu přepnutí může dojít ke krátkodobému poklesu tlaku (předčasné přepnutí), nebo nárůstu (pozdní přepnutí). Během dotlakové fáze dochází k prudkému nárůstu tlaku za téměř izotermických podmínek na maximální hodnotu. Po dosažení tlakové špičky začíná tavenina postupně chladnout, čímž se zvyšuje její viskozita a snímáný tlak pozvolna klesá. Účinek dotlaku již není dostatečný k překonání viskózního tření a k udržení konstantního tlaku v dutině. Sklon tlakové křivky je v této fázi určen polohou čidla. V pozici u vtokového ústí bude vykazovat mírnější

pokles. Se vzrůstající vzdáleností od vtoku bude tlakový pokles strmější. V momentě zatuhnutí vtokového ústí již není možné taveninu dále doplňovat, tlak prudce klesá a polymer se začíná smršťovat. Jakmile je dosaženo teplotně vyrovnaného stavu systému forma – výlisek (rovnoměrné teplotní pole v dutině formy), tlak klesá asymptoticky na zbytkovou hodnotu.



Plnění řízení rychlosti

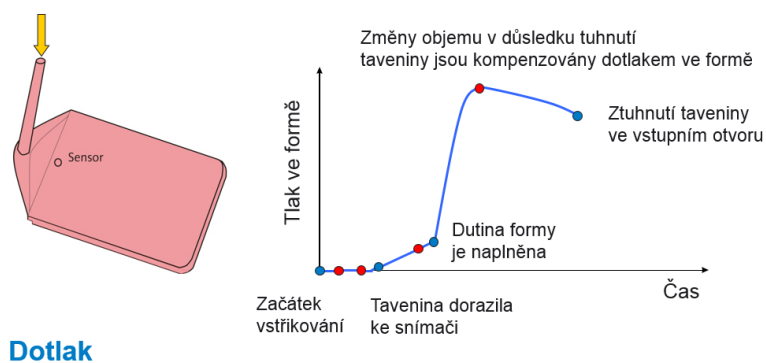
Obr. 32: Průběh tlaku v dutině formy - plnění [46]



Dotlak

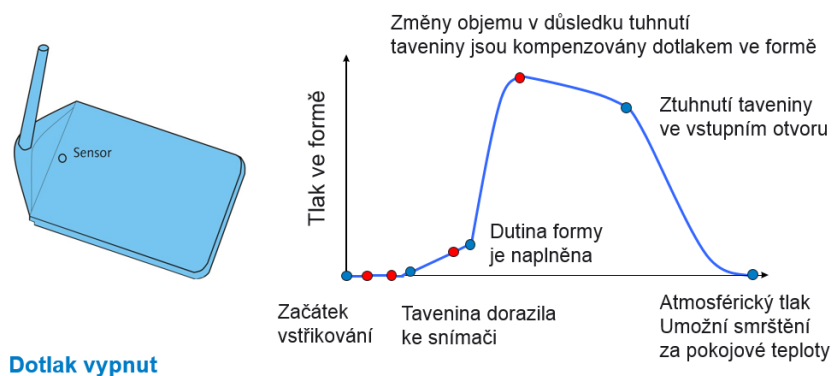
Přepnutí na dotlak

Obr. 33: Průběh tlaku v dutině formy – přepnutí na dotlak [46]



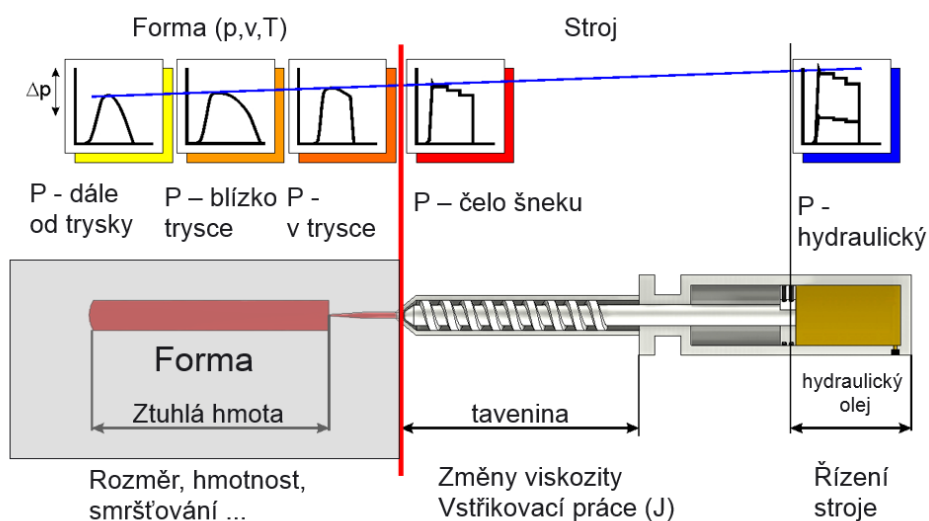
Dotlak

Obr. 34: Průběh tlaku v dutině formy – dotlaková fáze [46]



Dotlak vypnut

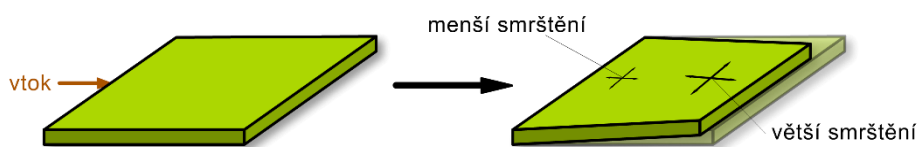
Obr. 35: Průběh tlaku v dutině formy – ukončení dotlakové fáze a zatuhnutí vtokového ústí [46]



Obr. 36: Průběh tlaku v systému vstřikovací stroj - forma [46]

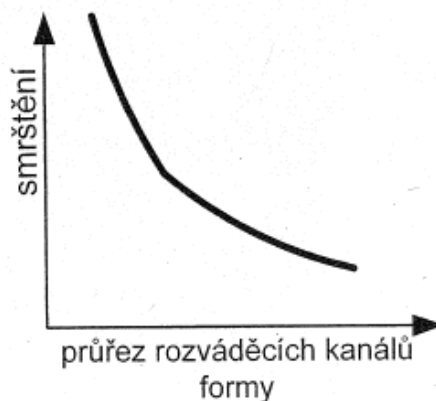
2.4 Vliv konstrukce formy a výstřiku na smrštění [3,28,34,38,39,40,43]

Vtoková soustava a její celkové uspořádání je dáno konstrukcí formy a počtem tvarových dutin (násobností). Zejména u termoplastů má druh a umístění vtoku podstatný vliv na proudění taveniny ve formě, vytváření tzv. studených spojů, orientaci makromolekul a plniva, rovnoměrnost krystalizace, anizotropii vlastností a rozměrů, povrchový vzhled apod. Ústí vtoku by mělo být umístěno do místa s největší tloušťkou stěny z důvodu požadovaného přenosu tlaku a dotlaku do výstřiku. V opačném případě by došlo k zamrznutí stěny s menší tloušťkou, což by zabránilo přísunu taveniny do smršťujícího se výstřiku. Vtok musí zajistit optimální plnění tvarové dutiny a fázi dotlaku a tím zmenšení hodnot smrštění. Ústí vtoku je třeba umístit tak, aby byl dosažen postupný lineární tok čela taveniny dutinou formy bez "předbíhání" toku některými partiemi tvaru a aby došlo k naplnění formy za co nejkratší dobu a za co nejmenších tlakových ztrát a pokud možno všude ve stejném čase. Pokud je použito pro jeden výstřik více vtoků, musí být umístěny tak, aby umožňovaly lineární tok jednotlivých proudů taveniny a nedocházelo k tvorbě studených spojů. Dále musí dojít k naplnění všech dutin současně a při stejných technologických podmínkách, a tedy při stejné teplotě taveniny a při stejném vnitřním tlaku, což zajistí rovnoměrné smrštění.



Obr. 37: Vliv umístění vtoku na smrštění [28]

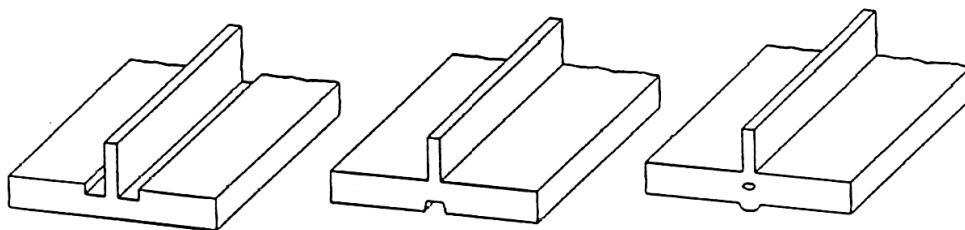
Velikost průřezu a délka rozváděcích kanálů ovlivňuje plnění tvarové dutiny formy. Se zvětšující se délkou rozváděcích kanálů se zvyšuje odpor proti toku taveniny, zhoršuje se přenos tlaku a tím i zvětšuje smrštění.



Obr. 38: Vliv průřezu rozváděcích kanálů $s[\text{mm}]$ na smrštění

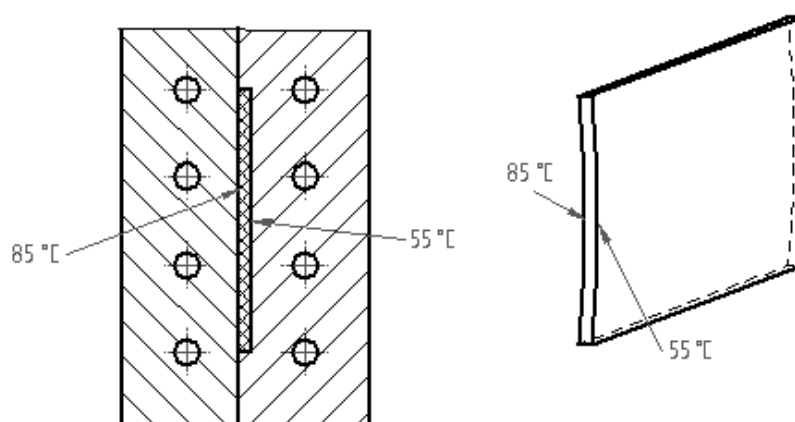
[34]

Umístění žeber na vstřikovaný díl obecně ovlivňuje smrštění a především stejnoměrnost smrštění. Žebra by měly být tenčí, než je nominální síla stěny, ke které jsou připojeny. Žebra obecně vykazují menší smrštění, než ostatní rozměry vstřikovaného dílu a výsledkem může být prohnutí nebo zkroucení. Proto se musí při navrhování dílu věnovat zvýšená pozornost způsobu napojení žeber a vnitřních prvků, zejména: - ostré přechody v dutině formy v souvislosti s umístěním žeber, které mohou narušit tok taveniny při plnění; - žebra mohou způsobovat významné změny tloušťky vstřikovaného dílu v okolí jeho napojení. Obě výše zmíněné okolnosti mohou nepříznivě ovlivnit rovnoměrnost plnění formy. K minimalizaci problému způsobeného ostrými přechody je doporučeno navrhovat rádius v místě připojení žeber, čímž dojde ke zjemnění plnění dutiny formy. Na druhou stranu příliš velký rádius může způsobit propadliny v místě pod připojeným žebrem, nebo ohnutí a větší podíl smrštění dílu jako důsledek silnějšího průřezu stěny. Obecně je doporučeno navrhovat tloušťku v místě připojení žebra ne více než 50 – 70 % tloušťky stěny výlisku. Nevhodně umístěná žebra mohou způsobit rozdíly ve smrštění a tím narušit rozměrovou stabilitu dílu.



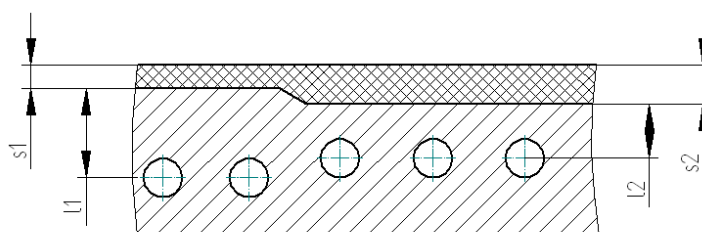
Obr. 39: Způsoby napojení žeber [41]

Rozdíly v teplotách stěn formy vyvolávají rozdílné hodnoty smrštění v daných místech. Je-li teplota na vnitřní a vnější straně výstřiku rozdílná, bude mít materiál ve styku s teplejší stěnou větší smrštění. Rozdíl v chlazení jednotlivých stran výstřiku způsobí posunutí teplotního profilu chladnoucí taveniny vzhledem k ose výstřiku a tím vznikne rozdílný potenciál pro smrštění a výsledkem je asymetrické rozdělení vnitřního pnutí na vnitřní a vnější straně. Je tedy nutno zajistit rovnoměrné rozložení teploty stěn tvarové dutiny formy. V některých konstrukčních případech je naopak možno tohoto efektu využít pro částečnou eliminaci deformace výstřiku.



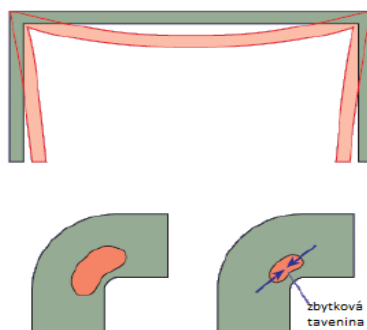
Obr. 40 Rozdílná teplota stěn výlisku

Vzdálenost kanálů od stěny tvarové dutiny formy by měla být taková, aby bylo dosaženo rovnoměrného chlazení pokud možno všech ploch výlisku současně. Především u dílů s rozdílnou tloušťkou stěny je třeba zabezpečit stejnoměrné chlazení. Tím dojde k eliminaci rozdílů smrštění při chladnutí výlisku a následné deformace. Při rozdílné tloušťce výlisku se kanály umísťují dle obrázku. Platí, že $s_1 < s_2$ a zároveň $l_1 > l_2$.



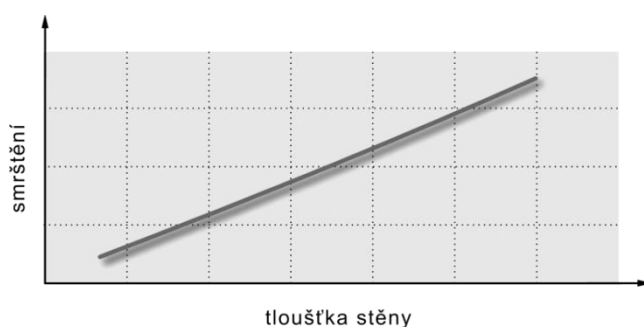
Obr. 41: Rozmístění temperačních kanálů ve formě

Problémy spojené s deformacemi hran vstřikovaných dílů mají přímou souvislost se smrštěním. Nerovnoměrný odvod tepla v těchto oblastech způsobuje větší podíl smrštění vnitřních hranových ploch. Výsledkem jsou napětí vyvolávající deformaci dílu. Podle Jansena a kol. [43] jsou průhyby dílů s ostrými hranami závislé na teplotních rozdílech a velikosti dotlaku. Hrany s větším rádiusem vykazovaly větší teplotní rozdíl v průřezu síly stěny, než díly s menším rádiusem. Během chlazení dílu ve formě dochází k menšímu odvodu tepla v oblasti vnitřních hran, čímž je narušena rovnoměrnost chladicího procesu. Důsledkem je menší velikost úhlu mezi stěnami dílu v porovnání s nominálními rozměry tvarové části formy a výsledná deformace.



Obr. 42: Deformace hran způsobená nerovnoměrným odvodem tepla [40]

Konstrukce výstřiku je velmi důležitá pro rozměrovou stabilitu.



Obr. 43: Vliv tloušťky stěny výstřiku na smrštění [33]

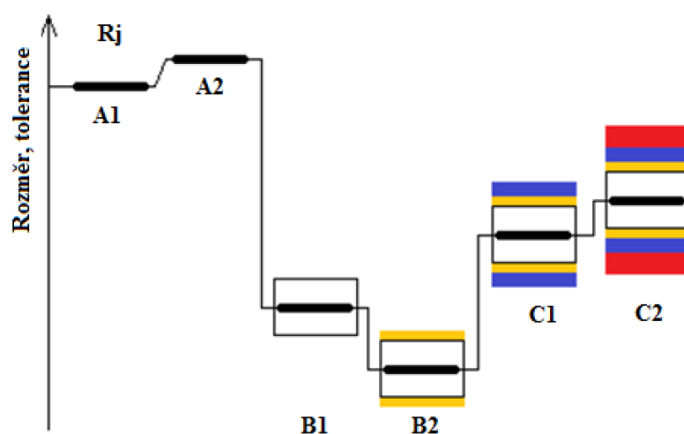
Větší tloušťka stěny výstřiku má podobný vliv jako zvýšená teploty formy je třeba více času na ochlazení, důsledkem čehož může proběhnou relaxace a v případě semikrystalických polymerů vznikají příznivější podmínky pro krystalizaci, což dále zvyšuje smrštění. Rozdílné tloušťky stěn výstřiku vedou ke změnám gradientu rychlosti ochlazování stěn výstřiku. Tavenina o stejné teplotě při téže teplotě stěny formy chladne rychleji v průřezu stěny o menší tloušťce. U

menších tloušťek mají fyzikální procesy kratší dobu na své působení. Obr. 43 znázorňuje obecnou závislost mezi tloušťkou stěny výstřiku a smrštěním.

Obecně není možné určit hranice pro rozdíl tloušťek (měli by být navrženy bez značných změn- rovnoměrnost tloušťky stěn), pro praxi je nezbytné znát alespoň základní korelaci mezi tloušťkou stěn a smrštěním. Jak již bylo řečeno, vstřikované díly s větší tloušťkou je poměrně složitější chladiť (delší doba chlazení) a je zapotřebí delší dotlakové fáze. Rozdílné nároky na chlazení u dílů s různou silou stěny vedou ke smrštění spojeným s vnitřním pnutím v místech, kde se mění síla stěny. Toto vnitřní pnutí může vést k okamžité, nebo opožděné deformaci dílu. Podle Seylera [39] vykazují tenkostěnné díly vyšší smykové napětí a větší orientaci ve směru toku. Toto navíc zvětšuje orientaci, která vede většímu vnitřnímu pnutí a zvyšuje riziko možné deformace dílu. Zvyšující se síla stěny zlepšuje tok polymerní taveniny a snižuje smykové napětí, čímž se snižuje orientace ve směru toku a redukuje možnost deformace.

2.5 Rozměrová přesnost vstřikovaných dílů [8,15,44]

Přesnost rozměrů (rozměrové tolerance) vstřikovaných dílů z polymerů je nutno uvažovat v závislosti na čase výrobního nebo životního cyklu. Jejich vlastnosti a rozměry se v čase mění a rozměrová a tvarová stálost je v porovnání s kovy horší. Schématické znázornění lineárních změn rozměrů vstřikovaných dílů z polymerů a jejich tolerance je na obr. 44.



Obr. 44: Schéma rozměrových změn a jejich tolerance [44]

A1 je stanoven jako výchozí střední rozměr ve formě. Je to buď vnitřní, nebo vnější rozměr tvarové dutiny formy a je zhotoven v určité toleranci znázorněné plným černým polem umístěným kolem středního rozměru. Při ohřevu formy na provozní teplotu se rozměr tvarové dutiny formy zvětší na hodnotu A2 i s uvažovanou výrobní tolerancí. Po vyjmutí výrobku z formy a 24 hodinovém skladování při daných teplotních a vlhkostních podmínkách má díl rozměr B1 vyznačeným bílým polem a zahrnuje rozdíly smrštění způsobené různou tloušťkou stěny, technologickými podmínkami a anizotropií. Toto smrštění je nevratné a nazývá se výrobní smrštění. Dalším postupným uvolňováním vnitřního pnutí, reorientačními pochody a v případě semikrystalických polymerů i dodatečnou krystalizací probíhá dodatečné smrštění, které trvá v časovém intervalu týdnů nebo měsíců. Rozměr se mění na hodnotu B2 a za normálních teplot a jeho hodnota obvykle bývá 10% hodnoty výrobního smrštění. Tolerance je vyznačena žlutým pásmem. Polymerní granuláty mají při zpracování velmi malý obsah vody. V případě navlhavých plastů jako je polyamid, nebo ABS se absorbovaný podíl vody odstraňuje před zpracováním sušením. Hotový plastový díl tedy může při užívání znovu navlhat a tím měnit své rozměry. Sorpce vody je velmi pomalá a obsah vody v dílu může být nerovnoměrně uložen, což způsobuje nerovnoměrné změny jeho rozměrů. Naopak se snižováním okolní vlhkosti se snižuje i obsah vody ve vstřikovaném díle a jeho rozměry se zmenšují. Obě tyto rozměrové změny jsou vratné a jsou v grafu znázorněny oblastí C1 s modře vyznačenými tolerancemi. Roztažení ohřevem popisuje změny rozměru ve vazbě na provozní teplotu vstřikovaného dílu. Nastává tehdy, jestliže je provozní teplota dílu odlišná od teploty, při níž byl měřen rozměr B1 a vlivem teplotní roztažnosti došlo ke zvětšení rozměrů. Tato změna je vratná, protože při ochlazení dojde ke smrštění. Tolerance je zde znázorněna červeně a zahrnuje rozptyl způsobený nehomogenitou struktury, anizotropií teplotní roztažnosti a nerovnoměrné teplotní pole dílu.

Z obr. 39 je zřejmé, že výsledná tolerance rozměrů vstřikovaného dílu aplikovaného v provozním režimu je dána součtem jednotlivých tolerancí rozměrových změn. Na šířku tolerančních polí jednotlivých rozměrových změn, především u výrobního a dodatečného smrštění, má vliv také variabilita technologických podmínek v jednotlivých výrobních cyklech. Čím menší je tato

variabilita, čím menší jsou odchylky ve struktuře jednotlivých dílů a užší toleranční pásma.

3. VÝZKUM VLIVU TECHNOLOGICKÝCH PARAMETRŮ NA PRŮBĚH TLAKU V DUTINĚ FORMY A LOKÁLNÍ VÝROBNÍ SMRŠTĚNÍ

Hlavním cílem disertační práce bylo získat poznatky o vlivu procesních parametrů na lokální dimenzionální změny vstřikovaného dílu vyrobeného ze zvolených materiálů ve speciální vstřikovací formě umožňující sledovat teplotní a tlakové děje během vstřikování. Výsledky práce by měly jednak potvrdit současné známé teoretické poznatky a zároveň nalézt optimální kombinaci technologických parametrů pro jednotlivé typy semikrystalického polymeru s cílem predikovat a ovlivnit výrobní smrštění dílů vyráběných vstřikováním.

Pro výzkum byl pro svoje široké uplatnění v technické praxi použit semikrystalický polymer – polypropylén ve třech různých modifikacích: základní homopolymer DOW H734-52RNA vyznačující se mnohostrannou použitelností a zvýšenou tepelnou odolností, dále homopolymer Scolefin 34 G 10-0 plněný 40 % skleněných vláken pro vstřikování technických dílů s požadovanou vysokou

pevností a homopolymer Scolefin 54 T 10-0 plněný 40 % talkem s využitím pro vstřikování výlisku s požadovanými nároky na tuhost.

Vzhledem k objemu a složitosti problematiky smrštění termoplastických výstřiků, působení a interakci mnoha faktorů ovlivňujících výrobní smrštění se tato práce zaměřuje pouze na zjištění vlivu vybraných procesních parametrů, které mají dle provedené teoretické rešerše a praxe buď zásadní, nebo nejednoznačný vliv na rozměrové změny a smrštění.

Cíle předkládané disertační práce lze shrnout do následujících bodů:

- Návrh a konstrukční řešení speciální vstřikovací formy pro výrobu zkušebního tělesa umožňující sledování tlakových a teplotních poměrů uvnitř tvarové dutiny a vyhodnocení vlivu vstřikovacích podmínek na lokální výrobní smrštění.
- Na základě statistických metod vybrat kombinace proměnných technologických parametrů tak, aby byly zachyceny a vyhodnoceny největší vlivy na výrobní smrštění
- Pro vybrané materiály s různými typy plniv určit vliv procesních parametrů na velikost lokálního výrobního smrštění v různé vzdálenosti toku
- Vyhodnotit průběh tlaku ve tvarové dutině formy.

3.1 Charakteristika použitých materiálů

3.1.1 Polypropylen homopolymer Dow PPH 734-52RNA

Dow PPH 734-52RNA je homopolymer s kontrolovanou rheologií, nukleačním a antistatickým aditivem. Díky vyšší tekutosti je snadno zpracovatelný, umožňuje kratší vstřikovací cyklus, vykazuje nízké hodnoty smrštění a deformace a má vysokou rozměrovou stabilitu.

Materiálový list pro materiál Dow PPH 734-52RNA je uveden v příloze 1.



Obr. 45: Granulát Dow PPH 734-52RNA

3.1.2 Polypropylen Scolefin 54 T 10-0

Homopolymer PP Scolefin 54 T 10-0 s obsahem 40 % talku – produkt firmy Ravago. Je to polymer s poměrně vysokou koncentrací minerálního plniva talku zastoupenou 40 hmotnostními procenty. Je dodáván ve formě granulátu. Používá se pro výrobu součástí světlometů nebo palubních desek.

Materiálový list pro materiál PP Scolefin 54 T 10-0 je uveden v příloze 2.



Obr. 46 : Granulovaný PP Scolefin 54 T 10-0

3.1.3 Polypropylen Scolefin 34 G 10-0

PP Scolefin 34 G 10-0 – produkt firmy Ravago - je polymer plněný 40 hm. % krátkých skleněných vláken. Je používán u aplikací, kde jsou zvýšené nároky na vyšší tuhost dílu oproti polymeru plněného minerálním plnivem –talkem, například na tělesa světlometů. Lze ho použít jako náhradu za materiály PA6 případně PA66. Požadavek na materiál je rozměrová stabilita, krátkodobá odolnost do 140 °C, vysoká odolnost vibracím s nízkou únavou materiálu.

Materiálový list pro materiál PP Scolefin 34 G 10-0 je uveden v příloze 3.

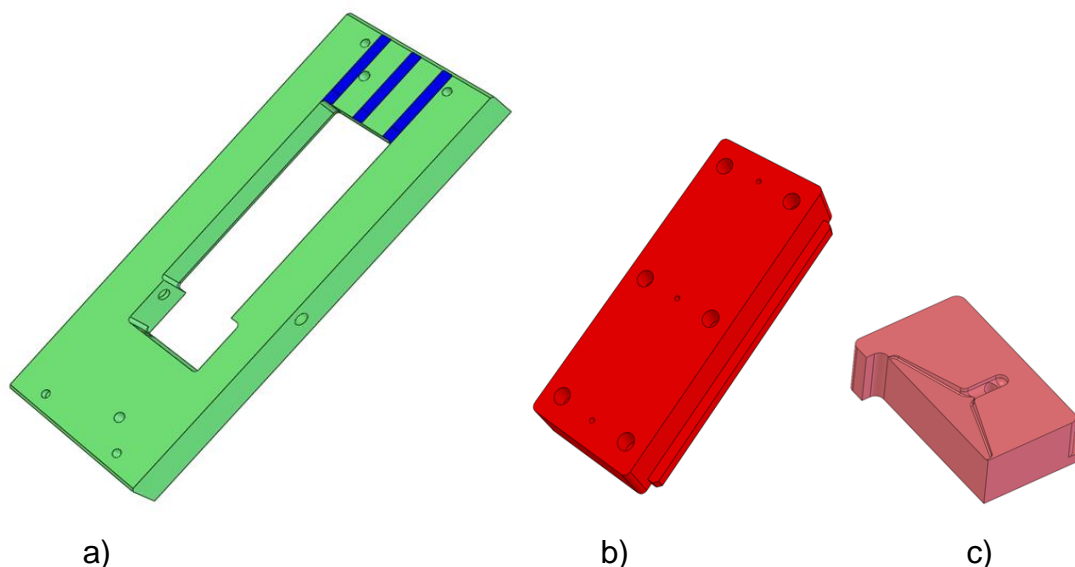


Obr.47: Granulovaný PP Scolefin 34 G 10-0

3.2 Vstřikovací forma

Pro účely výzkumné práce byl použit speciální jednonásobný nástroj – forma, navržený pro tento účel.

Vstřikovací forma pro výrobu zkušebních vzorků ke zkoumání velikosti smrštění, tlakových a teplotních poměrů v dutině formy, podle tohoto technického řešení, se skládá z pevné části, která je tvořena jednou pevnou deskou sloužící zároveň jako deska upínací a je zde alokována část vtokového systému společně s výměnnou vložkou. Dělicí rovina zároveň tvoří část tvarové dutiny vstřikovací formy. Pohyblivá část je naopak složena z více dílů, jelikož je zde umístěn systém vyhazovačů, matriční deska a vložka vytvářející vlastní tvarovou dutinu, temperanční systém přivedený přímo k matriční vložce skrze matriční desku tak, aby bylo docíleno max. chladicího účinku. Dále je zde umístěn systém čidel pro snímání teploty a tlaku v různých místech tvarové dutiny. Vstřikovací forma umožňuje vyrábět zkušební vzorky v několika tloušťkách, konkrétně 0,9; 2 a 4mm. Aby toto bylo možné, je zde tvarová vložka (obr. 48b) uložena tak, že se jejím přenastavením (posunutím) v axiálním směru vzhledem k ose vstřikovací trysky vytvoří požadovaná velikost dutiny. Pro všechny tři typy zkušebních vzorků je navržen filmový vtok (obr. 48c) v horní části zkušebního segmentu po celé jeho délce, aby bylo docíleno rovnoměrného plnění dutiny.

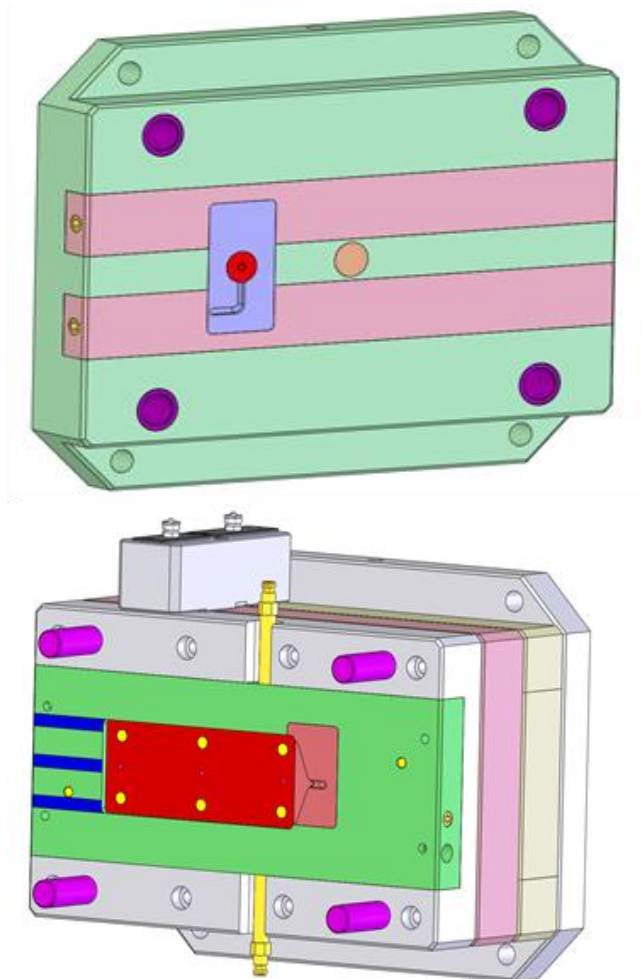


Obr.48: a) matriční vložka b) tvarová vložka c) vtoková vložka

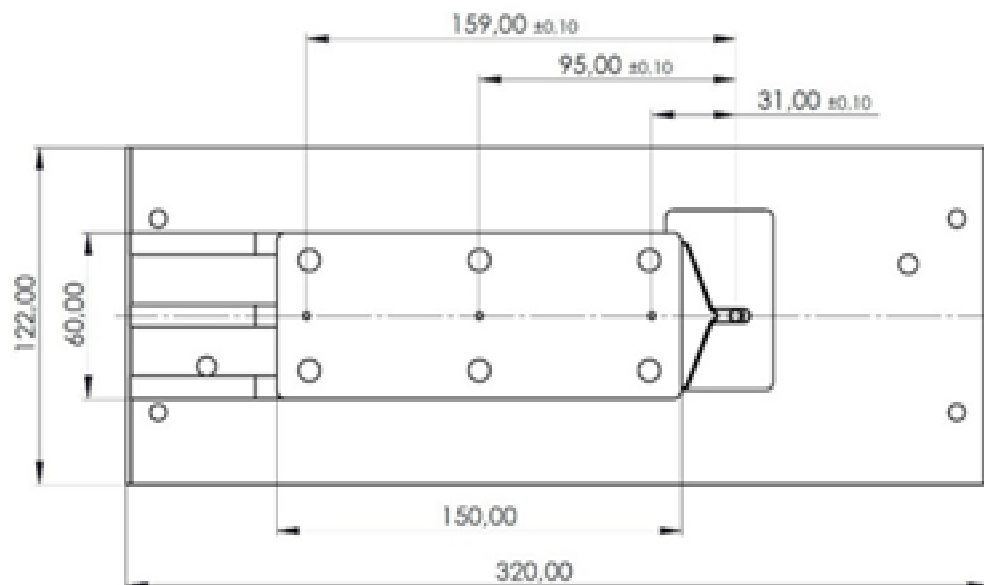
Jelikož se mění tloušťka destičky posunutím tvarové vložky, musí se vyměnit i vyhazovací kolíky a podložky čidel tak, aby odpovídaly aktuální poloze právě této

tvárové vložky. Toto se provádí jednoduchým rozebráním pohyblivé části vstřikovací formy, která je spojena pomocí šroubů. Aby nedocházelo ve formě k tzv. uzavírání vzduchu při vstřiku (diesel efekt) je v dolní části matriční vložky (obr. 48a) vyrobeno odvzdušnění. Středění pevné a pohyblivé poloviny vstřikovací formy je zajištěno pomocí kolíků a pouzder.

Výhodou tohoto řešení je tedy skutečnost, že je možné pomocí jednoduchého rozebrání pohyblivé části vstřikovací formy přenastavit velikost tvarové dutiny (tloušťku zkušební destičky) dle potřeby.



Obr. 49: Rozevřená forma v dělicí rovině

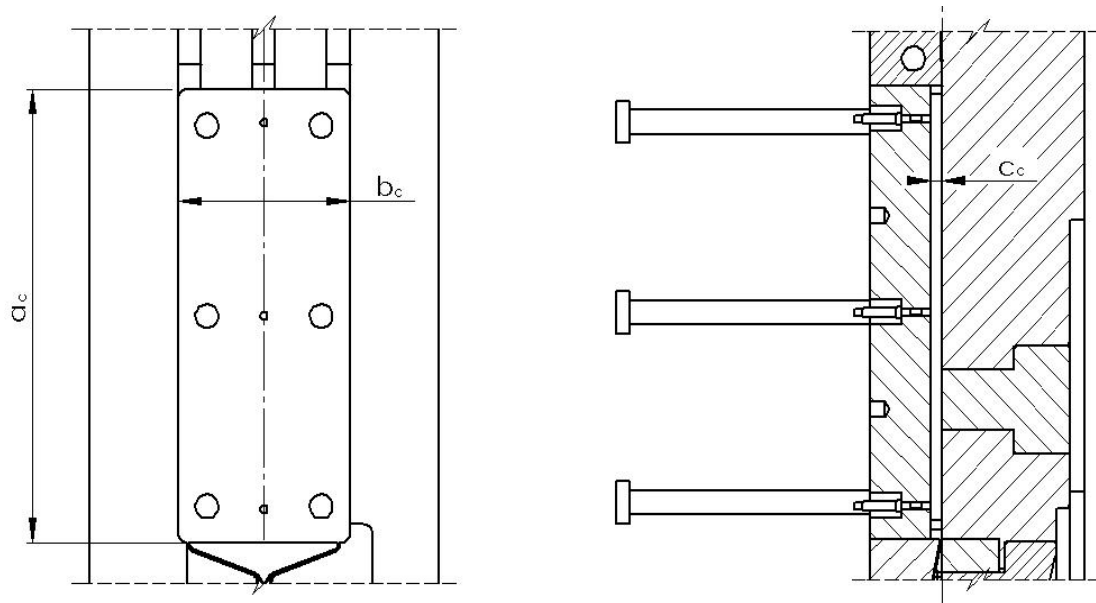


Obr. 50: Jmenovité rozměry tvarové dutiny a rozmístění čidel

Skutečné rozměry tvarové dutiny (Obr. 51) byly měřeny při ustálené teplotě 22°C v klimatizované místnosti měrového střediska. Měření bylo provedeno dle metodiky evropské normy ČSN EN ISO 294-4 Plasty – Vstřikování zkušebních těles z termoplastů – část 4: Stanovení smrštění. Naměřené skutečné hodnoty tvarové dutiny jsou uvedeny v tabulce 2.

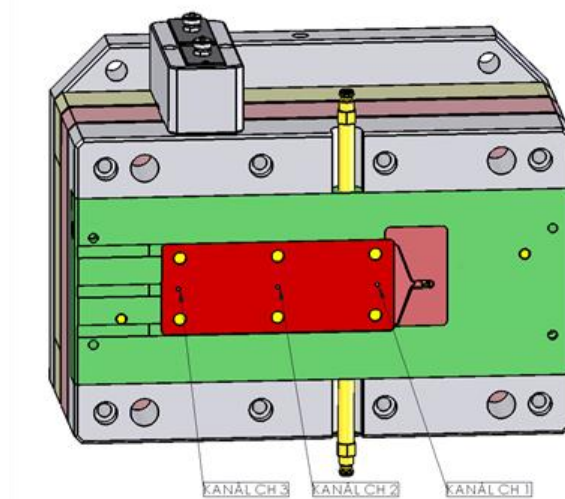
Tab. 2 : Skutečné rozměry tvarové dutiny

Tloušťka stěny	Rozměr	Velikost
2 mm	a_c	149,99 mm
	b_c	60,03 mm
	c_c	2,02 mm



Obr. 51 : Zobrazení měřených rozměrů tvarové dutiny

V průběhu experimentu byl snímán tlak a teplota uvnitř dutiny formy třemi kombinovanými čidly firmy Kistler (rozmístění čidel viz Obr. 52). Tyto senzory jsou určeny pro přímé měření tlaku a teploty a umožňují sledovat aktuální průběh obou veličin během procesu.



Obr. 52: Rozmístění snímačů v tvarové vložce

Čidlo (Obr. 53) je vhodné pro kombinované měření teploty a tlaku až do hodnoty 2000 bar. Tlak působí po celé čelní ploše čidla o průměru 2,5 mm a je přenášen do křemíkového měřicího elementu, který dle velikosti tlaku produkuje proporcionální elektrický náboj a ten je následně převeden na napětí 0 – 10 V a pomocí zesilovače zesílen a v takové podobě je pak k dispozici na výstupu.

Kontaktní teplota taveniny se také měří na přední části čidla pomocí jednoho páru termočlánků typu K (NiCr-Ni). Díky malým rozměrům má čidlo velmi krátké doby odezvy.

Čidlo je vhodné především pro průmyslové aplikace, jako je sledování, kontrola a optimalizace při vstřikování termoplastů a elastomerů



Obr. 53: Detail snímače pro přímé měření tlaku

3.3 Vstřikovací stroj

Testy byly provedeny na vstřikovacím lise ARBURG ALLROUNDER 570 C 2000-675 (viz. Obr. 54).



Obr. 54: Vstřikovací lis ARBURG ALLROUNDER 570 C 2000-675.

Tab. 3 : Technické parametry vstřikovacího lisu ARBURG 570 C 2000-675

Technické parametry	Jednotky	Hodnoty
Maximální uzavírací síla	kN	2200
Průměr šneku	mm	55
Maximální váha výstřiku	g	390
Maximální vstřikovací rychlost	$\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	260
Maximální protitlak (pozitivní / negativní)	MPa	35/16
Maximální objem vstřikovacího válce	cm^3	427
Maximální vstřikovací tlak	MPa	189

3.4 Volba parametrů experimentu

3.4.1 Materiálové parametry

Za první parametr experimentu lze považovat rozdílný typ semikrystalického termoplastu. Ve všech případech byl zvolen homopolymer polypropylénu, avšak ve třech různých modifikacích. V prvním případě se jednalo homopolymer polypropylenu Dow PPH 734-52RNA, druhým materiálem byl homopolymer polypropylenu PP Scolefin 54 T 10-0 s obsahem 40 % talku a třetím materiálem byl homopolymer polypropylenu PP Scolefin 34 G 10-0 s obsahem 40 % skleněných vláken.

3.4.2 Konstrukční parametry

Dalším parametrem experimentu byla zvolena velikost tloušťky stěny zkušební obdélníkové destičky 2 mm. Tato hodnota přibližně reprezentuje střední hodnotu tloušťky stěn v praxi používaných technických výstřiků. Pokud by byla do experimentu zahrnuta i síla stěny 0,9 mm a 4 mm byl by značně navýšen počet měření v experimentu, navíc by bylo potřeba upravit technologické parametry. Z toho důvodu byl tento parametr ponechán na jedné úrovni. Tloušťka vtokového ústí byla 0,85 mm.

3.4.3 Technologické parametry

Technologické parametry do značné míry determinují proces vstřikování plastů a mají signifikantní vliv na velikost smrštění výstřiku. Základní nastavované technologické parametry v experimentu byly:

- Teplota taveniny
- Vstřikovací tlak
- Vstřikovací rychlost
- Dotlak (Velikost dotlaku)
- Doba dotlaku
- Teplota temperačního okruhu
- Doba chlazení výstřiku ve formě

Vliv těchto parametrů přispívá k finálním vlastnostem výrobku. Každý parametr nelze hodnotit samostatně, ale je potřeba vzít v úvahu jejich vzájemnou interakci. Změna nastavení jednotlivých úrovní proměnných může hodnotu smrštění bud zvětšovat, nebo naopak zmenšovat. Míra jejich vlivu je různá a můžou se bud doplňovat anebo si vzájemně odporovat.

Pokud by se měl experiment provést pro všechny výše uvedené základní parametry, obsahovala by úplné faktorová analýza pro všech 7 faktorů na 3 úrovních $3^7 = 2187$ pokusů vždy pro jeden typ použitého materiálu. Takovýto rozsah experimentálního měření by nebylo možno obsáhnout v rámci této práce, proto byly z důvodu snížení počtu pokusů měněny na třech úrovních tři parametry, které buď nejvíce ovlivňují smrštění, nebo mají na smrštění nejednoznačný vliv – dotlak (velikost dotlaku), teplota taveniny a vstřikovací rychlost.

3.4.3.1 Teplota taveniny

Přímé měření teploty taveniny při vstřikovacím procesu nebylo doposud v praxi úspěšně implementováno. Požadovaných hodnot se dosáhne nepřímo nastavením teploty odporových topných pásů umístěných v plášti plastifikační komory vstřikolisu.

V experimentu byla teplota taveniny nastavována na třech úrovních v hodnotách 220°C, 240°C a 260°C. Tyto hodnoty se nachází v intervalu zpracovatelských teplot udávaných v provozních listech výrobců materiálu. Nejnižší (220°C) a nejvyšší (260°C) nastavovaná teplota koresponduje s výrobcem doporučenými limitními hodnotami pro zpracování.

3.4.3.2 Vstřikovací rychlost

Při nízké vstřikovací rychlosti většinou vyvstává potřeba zvyšování teploty taveniny z důvodu tokového naplnění tvarové dutiny formy. Zvyšováním vstřikovací rychlosti dochází díky zvýšení smykového namáhání k růstu teploty taveniny. Měnění její hodnoty se docílí pomocí programované rychlosti axiálního posuvu šneku v plastifikační komoře.

Pro účely experimentu byla vstřikovací rychlost nastavovaná opět ve třech úrovních a to tak, aby byl plně pokryt v praxi používaný rozsah vstřikovacích rychlostí. Nastavované hodnoty byly $20 \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $100 \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a $200 \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

3.4.3.3 Dotlak (Velikost dotlaku)

Způsob stanovení limitních hodnot velikosti dotlaku vychází jak z praktického přístupu, založeného principiálně na vizuálním posouzení výstřiků a kontrole rozměrových a hmotnostních veličin, tak analýzou dat získaných ze simulačních

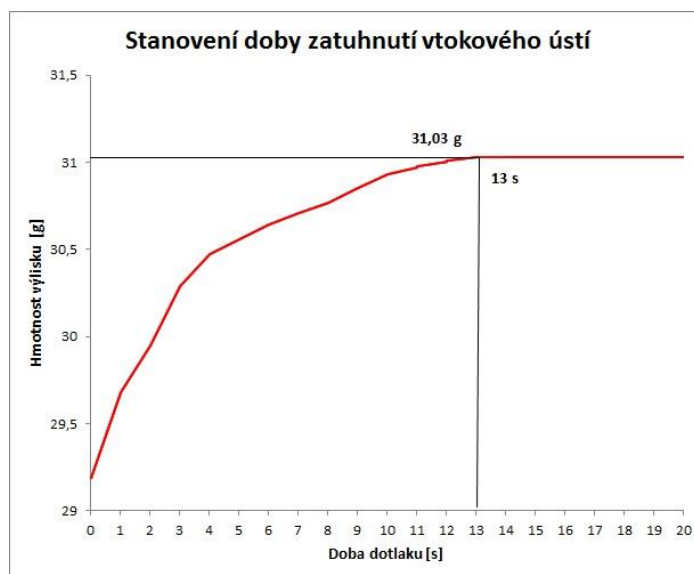
programů. V praxi se běžně pracuje s velikostí dotlaku v mezích od 40 – 90 % hodnoty vstřikovacího tlaku.

V experimentu byly na základě poznatků z praxe a zaměření této práce na lokální rozměrové změny nastavovány hodnoty dotlaku na třech různých úrovních. Pro zkušební destičku o tloušťce 2 mm byla velikost dotlaku 80 %, 90% a 100% hodnoty vstřikovacího tlaku při přepnutí na dotlak.

Všechny ostatní technologické parametry nastavované společně s proměnnými parametry byly v průběhu experimentu konstantní (viz tab. 4)

3.4.3.4 Stanovení doby dotlaku

Doba dotlakové fáze je technologickým parametrem, který významně ovlivňuje smrštění dílu. Výše jeho trvání musí být dostatečná, aby došlo k doplnění potřebného množství taveniny vyrovnávajícího objemovou kontrakci při chladnutí výlisku, a musí přesáhnout ukončení procesu krystalizace z důvodu minimalizace smrštění. Je-li dotlak ukončen před zatuhnutím vtokového ústí, může dojít k porušení tvarové integrity dílu a zpětnému toku taveniny do vtokového systému. Prodlužování doby dotlaku po zamrznutí vtokového ústí je nevhodné a nemá na vlastnosti výstřiku žádný vliv. Pro stanovení doby dotlaku byla použita metoda sledování hmotnosti výstřiku při postupně zvyšujících se dobách dotlaku. Kritériem byl výstřik, u kterého byla predikce nejdelšího časového intervalu potřebného k zatuhnutí taveniny. Dle teoretických předpokladů byla nastavena v rámci experimentu nejvyšší volená teplota taveniny (260 °C) a nejvyšší vstřikovací rychlost ($200 \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) u neplněného polymeru. Postupně byla zvyšována doba dotlaku až do okamžiku, kdy se přestala měnit hmotnost výstřiků s dalším prodlužováním doby dotlaku (viz. Obr. 55). Na základě měření byla stanovena doba dotlakové fáze 13 s. Tato hodnota byla použita pro všechny kombinace technologických parametrů v experimentu.



Obr. 55 : Stanovení doby dotlaku

3.4.3.5 Teplota formy

Teplota stěny formy má vliv na tokové chování taveniny a krystalizaci. Nízká teplota stěny formy způsobuje vysoký gradient chlazení, což má za následek nízký stupeň krystalizace a nízké výrobní smrštění, vysoká teplota způsobuje vysoký vyšší podíl krystalické fáze a tím vyšší výrobní smrštění. Pro semikrystalický materiál použitý v experimentu je ve zpracovatelských podmínkách uveden teplotní rozsah 30 – 60 °C. V souvislosti možného přínosu výsledků práce pro praxi byla volena teplota 30 °C z důvodu maximální ekonomičnosti cyklu.

3.4.3.6 Doba chlazení výstřiku ve formě (teplota odformování)

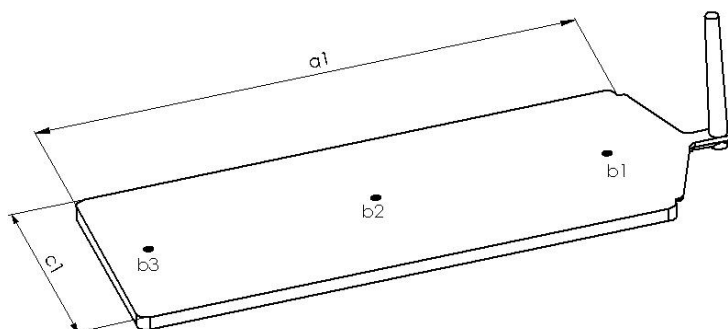
Doba chlazení výstřiku musí být taková, aby při odformování byla dosažena v místech s nejvíce ohřátou taveninou (obvykle ve středu průřezu stěny dílu s největší tloušťkou) požadovaná teplota, zajišťující bezpečné vyhození výstřiku z formy bez rizika deformací způsobených nedostatečnou tuhostí dílu. Doba chlazení byla stanovena pro maximální hodnoty parametrů experimentu – síla stěny 2 mm, vstřikovací rychlost $200 \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, teplota taveniny 260°C a velikost dotlaku 100% hodnoty vstřikovacího tlaku při přepnutí na dotlak. Doba chlazení byla určována od okamžiku ukončení dotlakové fáze. Pro všechny parametry experimentu byla stanovena na 20 s. Celková doba cyklu byla 40 s.

Tab. 4 : Technologické parametry experimentu pro tloušťku destičky 2 mm

Parametr	2 mm
Velikost dotlaku [%]	80, 90, 100
Bod přepnutí na dotlak	100% objemu vzorku
Vstřikovací rychlost [$\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]	20, 100, 200
Teplota taveniny [$^{\circ}\text{C}$]	220, 240, 260
Teplota temperačního okruhu [$^{\circ}\text{C}$]	30
Doba dotlaku [s]	13
Doba chlazení [s]	20
Doba cyklu [s]	40
Dávkovací dráha [cm^3]	55

3.5 Metodika výpočtu výrobního smrštění

Pro metodiku a výpočet velikosti smrštění byla použita česká verze evropské normy EN ISO 294 – 4: 2003. Tato část ISO 294 specifikuje metodu stanovení výrobního smrštění a dodatečného smrštění vstřikovaných zkušebních těles z termoplastů ve směru rovnoběžném a ve směru kolmém ke směru toku taveniny v dutině formy. V této normě jsou popsána zkušební tělesa o rozměrech 60 x 60 x 2 mm. Předmětem experimentu bylo zkušební těleso o rozměrech 150 x 60 x 2 mm. Na rozdíl od metodiky formulované touto normou byla s ohledem na cíle této práce na zkušebním tělese měřena délka a_1 a šířka b_1 , dále byla měřena síla stěny výstřiku ve třech různých referenčních bodech směrem od vtokového ústí - b_1 (u vtoku), b_2 (střed tokové dráhy), b_3 (konec toku).



Obr. 56: Schématické zobrazení měřených bodů

Při ustálené teplotě 22 °C je měřena délka a_c , tloušťka b_c a šířka c_c , a tvarové dutiny formy mezi příslušnými referenčními body (viz. kapitola 3.2) s přesností 0,02 mm. Dále se po uplynutí 16 - 24 hodin při stejných podmínkách měří rozměry zkušebního tělesa mezi referenčními body korelujícími s referenčními body tvarové dutiny. Lokální výrobní smrštění tloušťky (S_{b1} , S_{b2} , S_{b3}), výrobní smrštění ve směru podélném se směrem toku taveniny (S_{Mp}) a výrobní smrštění ve směru kolmém ke směru toku taveniny (S_{Mn}) jsou dány následujícími vztahy:

$$S_{b1} = \frac{(b_c - b_1)}{b_c} \cdot 100 \quad (28)$$

$$S_{b2} = \frac{(b_c - b_2)}{b_c} \cdot 100 \quad (29)$$

$$S_{b3} = \frac{(b_c - b_3)}{b_c} \cdot 100 \quad (30)$$

kde b_c je tloušťka referenčního bodu tvarové dutiny [mm]
 b_1 ; b_2 ; b_3 je tloušťka odpovídajících referenčních bodů zkušebního tělesa [mm]

$$S_{Mp} = \frac{(a_c - a_1)}{a_c} \cdot 100 \quad (31)$$

kde a_c je délka referenčních bodů tvarové dutiny [mm]
 a_1 je délka odpovídajících referenčních bodů zkušebního tělesa [mm]

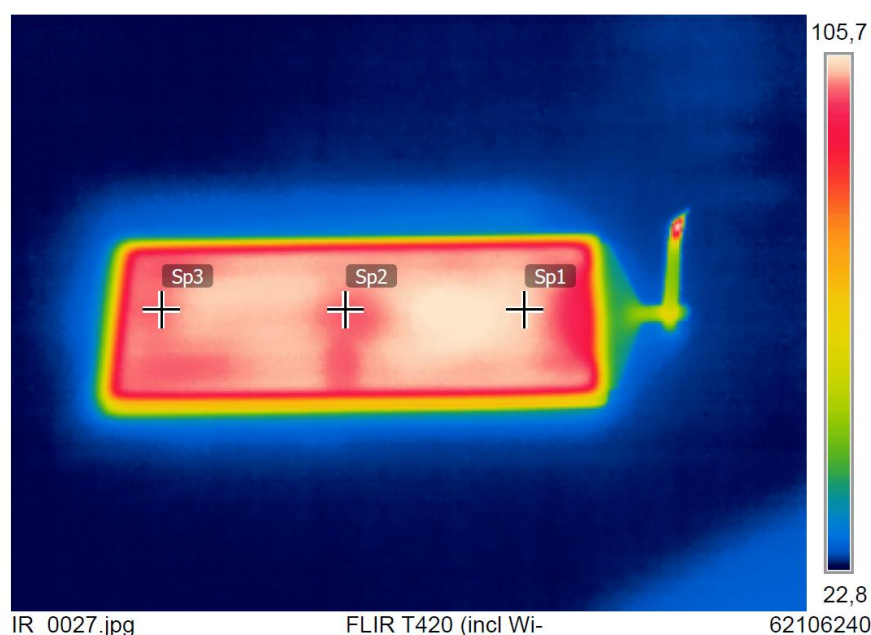
$$S_{Mn} = \frac{(c_c - c_1)}{c_c} \cdot 100 \quad (32)$$

kde c_c je šířka referenčních bodů tvarové dutiny [mm]
 c_1 je šířka odpovídajících referenčních bodů zkušebního tělesa [mm]

3.6 Měření výrobního smrštění

Měření lokálního výrobního smrštění bylo prováděno s ohledem na předchozí odstavec. Pro každou jednotlivou variantu experimentu s danou kombinací materiálových, technologických a konstrukčních parametrů byla nejprve provedena iniciační série vstřiků a zhotoven termografický snímek zkušebního

tělesa termokamerou FLIR T400 (Obr. 57). Po ustálení vstřikovacího procesu (pro každou variantu minimálně deset vstřikovacích cyklů) bylo vyrobeno a odebráno sedm zkušebních těles. Po otevření formy a vyhození zkušebního vzorku byl ihned odříznut zbytek vtoku (rozdávěcí kanálek) z důvodu maximální eliminace deformace vzorku. Po vychladnutí byl každý vzorek označen jednoznačným identifikačním kódem. Během experimentu byly sledovány a kontrolovány potřebné technologické parametry. Teplota temperačního média oscilovala s odchylkou ± 1 °C, kontrolovanou automatickým výstražným systémem na temperačním agregátu.



Obr. 57: Termografický snímek zkušebního tělesa

Zkušební tělesa byla volně uložena v klimatizované místnosti s kontrolovanou teplotou 23 °C po dobu 24 hodin. Měření bylo prováděno na prvních pěti zkušebních tělesech pro každou kombinaci parametrů. Všechny rozměry byly zaznamenány do příslušných tabulek a byla vypočtena průměrná hodnota výrobního smrštění. Dvě záložní zkušební tělesa nahrazovaly v případě odchylky rozměrů větší než 5% střední hodnoty měřeného rozměru některý z první pěti zkušebních těles.

Pro měření délkových rozměrů zkušebních těles byly použity měřicí přístroje ověřené akreditovanou kalibrační laboratoří. Šířka byla měřena digitálním úchylkoměrem Mitutoyo ID-F150 upevněném v měřicím přípravku s přesností 0,001 mm (Obr. 58). Tloušťka byla měřena digitálním třmenovým mikrometrem

Mitutoyo DIGIMATIC 293 přesností 0,001 mm uchyceného ve speciálním přípravku (Obr. 59).



Obr. 58 : Digitální úchylkoměr Mitutoyo ID-F 150



Obr. 59 : Digitální třmenový mikrometr Mitutoyo DIGIMATIC 293

4. VÝSLEDKY A VYHODNOCENÍ PRŮBĚHU TLAKU V DUTINĚ FORMY

4.1 Vyhodnocení průběhu tlaku v dutině formy

Vliv technologických parametrů na průběh tlaku uvnitř dutiny formy je znázorněn na obrázcích. Tlakové křivky pro jednotlivé pozice čidla podél tokové dráhy (blízko vtokového ústí – pozice 1, střed tokové dráhy – pozice 2 a konec tokové dráhy – (pozice 3) jsou funkcí času jednotlivých kombinací zkoumaných technologických parametrů (teplota taveniny, rychlost vstřikování, velikost dotlaku). Z důvodu redukce velkého množství dat byly vyhodnoceny hodnoty průběhu tlaku z každého sedmého vstřikovacího cyklu pro všechny kombinace zkoumaných parametrů. Tlakové křivky poskytují detailnější informace o vlivu tlaku uvnitř formy během vstřikovacího cyklu na smrštění výstřiku.

Nastavované kombinace zkoumaných technologických parametrů jsou uváděny v následujícím pořadí:

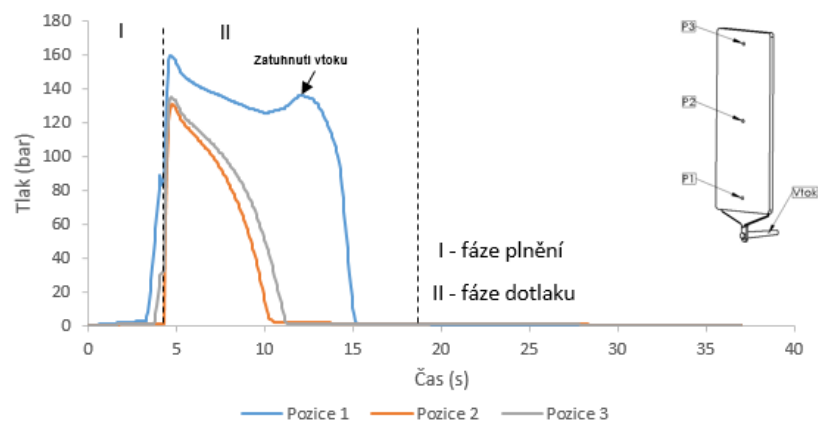
Dotlak [%] – Teplota taveniny [°C] – Vstřikovací rychlost [$\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$].

Zkoumané technologické parametry byly měněny na třech úrovních (viz. Tab. 5) Absolutní hodnoty velikosti dotlaku [MPa] pro jednotlivé typy materiálů jsou uvedeny v tabulkách 5 - 7. Hodnoty tlaku u jednotlivých zobrazení tlakového průběhu v dutině formy jsou udávány v jednotkách [bar] z důvodu exportu dat z monitorovacího zařízení Kistler. Kombinace proměnných parametrů byly sestaveny do ortogonální matice L_9 a následně vyhodnoceny pro jednotlivé úrovně dotlaku. Toto uspořádání umožňuje redukci všech možných kombinací technologických parametrů na optimální počet variant těchto parametrů.

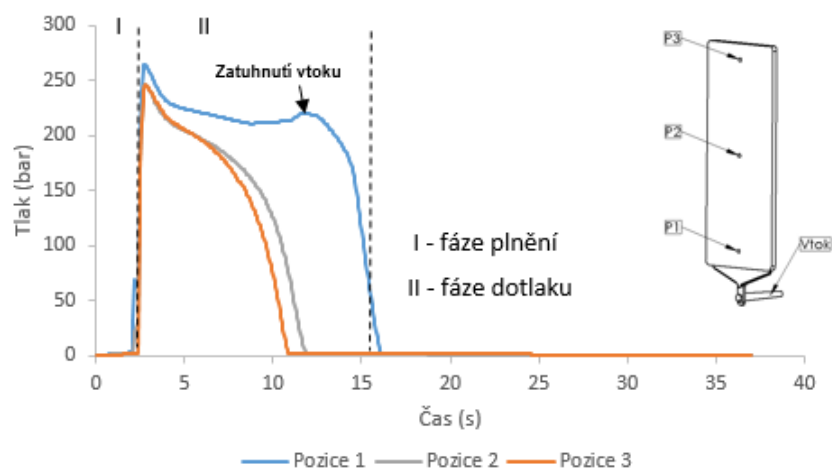
Tab. 5 :Ortogonalní matice L_9

Faktor Experiment	Dotlak - A	Teplota taveniny - B	Vstřikovací rychlost - C
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

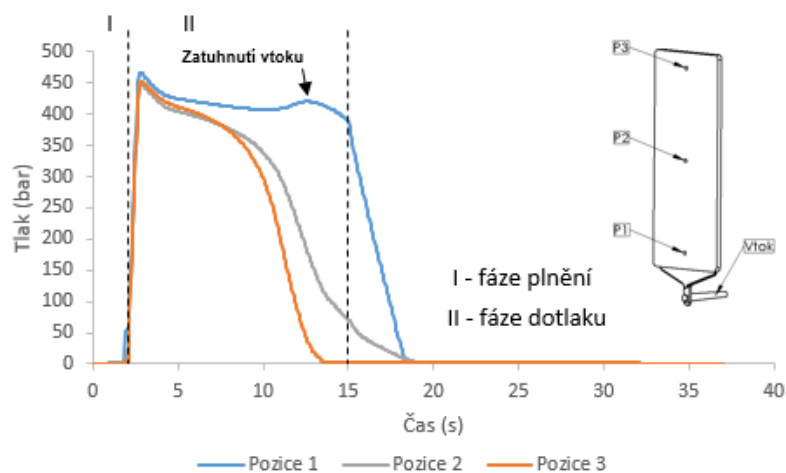
4.2 Výsledky a vyhodnocení průběhu tlaku v dutině formy pro materiál Dow PPH 734-52RNA



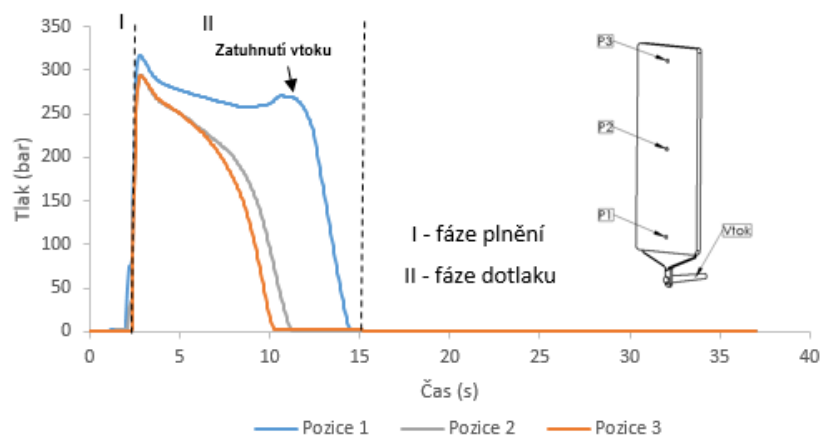
Obr. 60: Průběh tlaku v dutině pro parametry 80-220-20



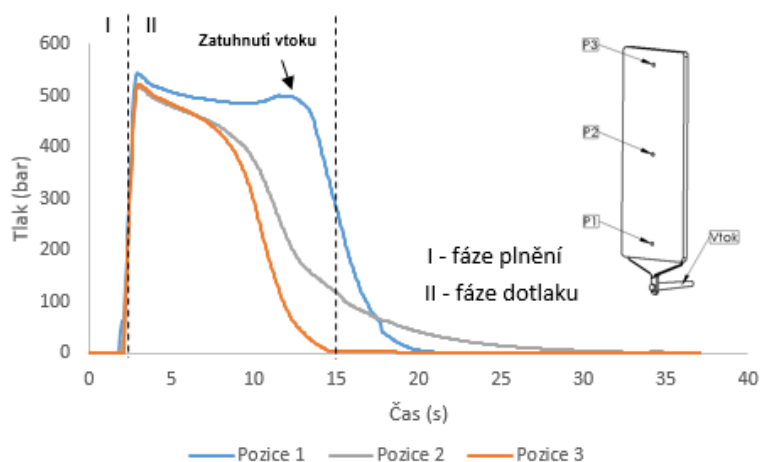
Obr. 61 : Průběh tlaku v dutině pro parametry 80-240-100



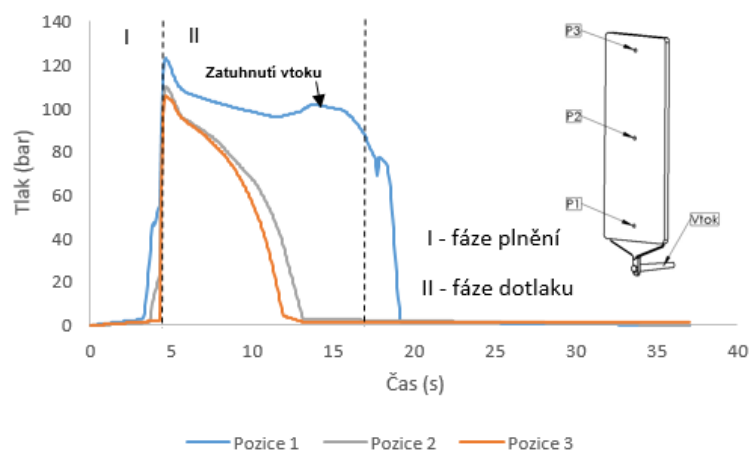
Obr. 62 : Průběh tlaku v dutině pro parametry 80-260-200



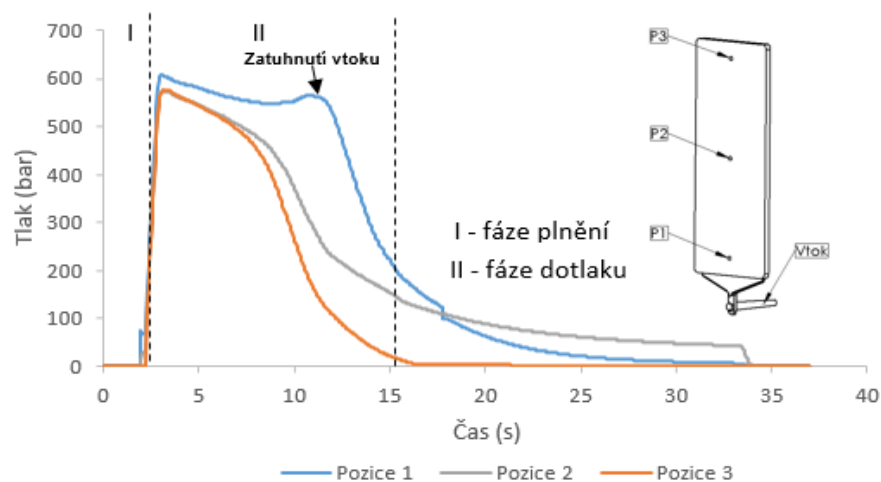
Obr. 63: Průběh tlaku v dutině pro parametry 90-220-100



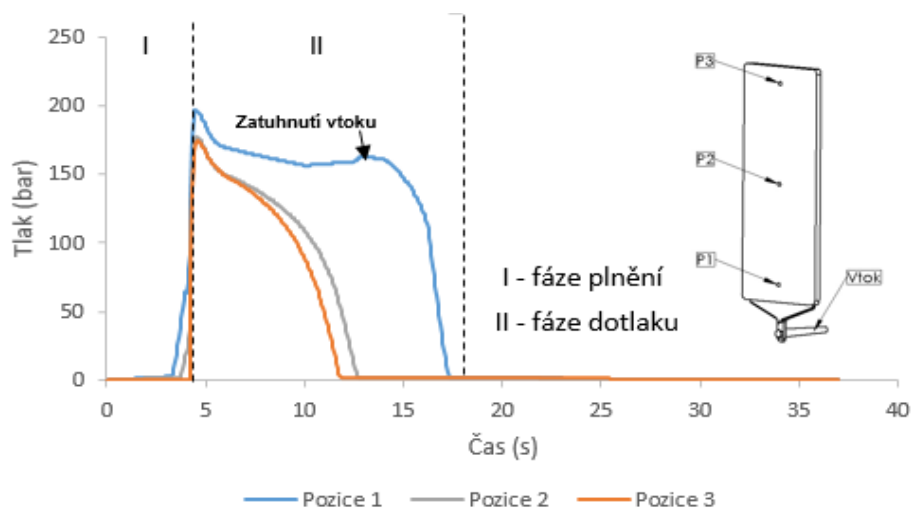
Obr. 64: Průběh tlaku v dutině pro parametry 90-240-200



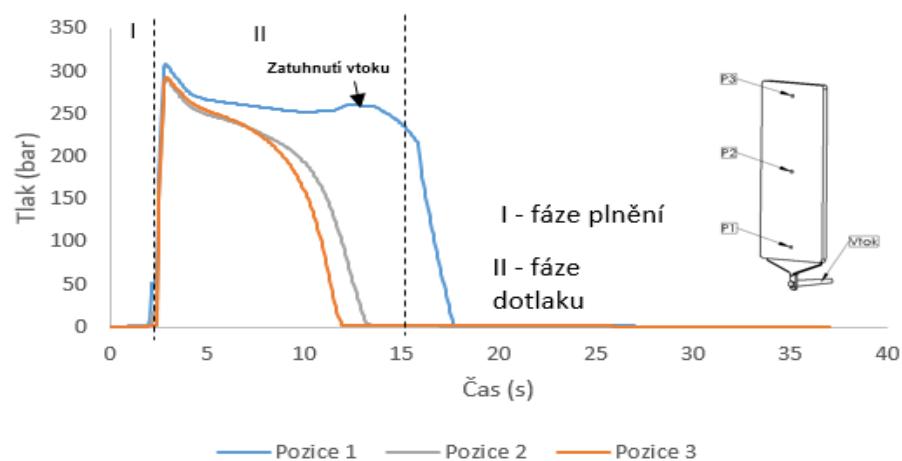
Obr. 65: Průběh tlaku v dutině pro parametry 90-260-20



Obr. 66: Průběh tlaku v dutině pro parametry 100-220-200



Obr. 67: Průběh tlaku v dutině pro parametry 100-240-20



Obr. 68: Průběh tlaku v dutině pro parametry 100-260-100

4.2.1 Vyhodnocení průběhu tlaku v dutině formy pro hladinu dotlaku

80 %

Průběh tlaku v dutině formy pro materiál PP Dow PPH 734-52RNA pro hladinu dotlaku 80% v kombinaci s různými nastavenými technologickými parametry v různých pozicích čidla je znázorněn na obrázcích 60 - 62. Z křivek zaznamenaných čidlem 1 umístěným u vtokového ústí lze u hladiny dotlaku 80 % pro všechny kombinace s ostatními technologickými parametry pozorovat v časovém intervalu 12-13 s tlakový nárůst následovaný prudkým poklesem tlakového profilu zaznamenaným čidly 2 a 3. Na grafu je vidět, že pokles tlaku v oblasti vtoku (pozice 1) je přerušen druhou tlakovou špičkou, kdy dochází k zatuhnutí vtokového ústí. Průběh tlaku snímaný v pozicích 2 (střed tokové dráhy) a 3 (konec toku) již tento jev nevykazuje, tlak prudce klesá z maximálních hodnot na zbytkovou úroveň v čase 10-11 s. Z toho lze usuzovat, že mezi pozicemi 1 a 2 je již tavenina zatuhnutá a polymer se smršťuje. Tlak v dutině dosáhl nulových hodnot před ukončením dotlakové fáze pro kombinace parametrů se vstřikovací rychlosti do 100 ccm.s^{-1} a teplotou taveniny do 240°C .

Při nastavených parametrech 80-220-20 klesne tlak na nulovou hodnotu v čase 10 až 15 s. Vzhledem k nízké vstřikovací rychlosti 20 ccm.s^{-1} a nejnižší nastavené teplotě taveniny 220°C polymer rychle tuhne zhruba od poloviny tokové dráhy, jak je patrné z průběhu tlaku snímaném na pozicích 2 a 3 se zaznamenaným maximálním tlakem 13,5 respektive 13 MPa. U vtokového ústí chladne tavenina pomaleji, což zlepšuje tlakovou odezvu a tlaková špička v tomto místě dosahuje hodnoty 16 MPa. Zkušební těleso se začíná smršťovat ve směru tloušťky v čase 10 – 11 sekund v pozicích 2 a 3, v čase 15 v pozici 1. Ze zaznamenaných tlakových profilů lze tedy konstatovat, že se zkušební těleso začíná smršťovat ve směru tloušťky po celé délce ještě před ukončením fáze dotlaku.

Parametry 80-240-100 - vykazují podobný průběh tlaku, avšak vyšší vstřikovací rychlost 100 ccm.s^{-1} spolu s vyšší teplotou taveniny 240°C posouvá tlakovou špičku u všech měřených pozic k vyšším hodnotám a snižuje rozdíly maximální hodnoty tlaku mezi jednotlivými pozicemi. Tlak klesá na nulovou hodnotu v časovém intervalu 11 – 16 s. Naměřená tlakové maximum 24,6 MPa je pro pozice 2 a 3 shodná, u vtokového ústí (pozice 1) dosahuje hodnoty 26,5 MPa. Zkušební těleso se začíná smršťovat ve směru tloušťky v čase 11 – 12

s v pozicích 2 a 3, v čase 16,1 s v pozici 1, tedy v okamžiku ukončení fáze dotlaku.

Parametry 80-260-200 - vysoká vstřikovací rychlost 200 ccm.s^{-1} a vysoká teplota taveniny 260°C vedou ke snížení viskozity a zpoždění solidifikace, menšímu tlakovému poklesu s výslednou vyšší hodnotou tlakového integrálu během dotlakové fáze v dutině formy. Tlak působí na tuhnoucí taveninu po celou dobu dotlakové fáze v okolí vtokového ústí (pozice 1). Rovněž tlakové křivky pro pozice 2 a 3 mají pozvolnější pokles a tlak působí na zkušební těleso delší dobu. To je patrné zejména na průběhu tlaku snímaného čidlem umístěným ve středu tokové dráhy (pozice 2), kdy tlak dosáhl nulové hodnoty déle, nežli na pozici 1. V tomto místě pravděpodobně došlo vlivem vysoké vstřikovací rychlosti a teploty taveniny ke zpoždění solidifikace, přesto, že vtokové ústí již zatuhlo. Tlak klesl na nulové hodnoty v čase 14,1 – 19 s. Maximální naměřené hodnoty tlaku byly v místě vtokového ústí (pozice 1) 46,7 MPa, uprostřed tokové dráhy (pozice 2) 45,2 MPa a na konci dráhy (pozice 3) 44,7 MPa.

4.2.2 Vyhodnocení průběhu tlaku v dutině formy pro hladinu dotlaku

90 %

Průběh tlaku v dutině formy pro materiál PP Dow PPH 734-52RNA pro hladinu dotlaku 90% v kombinaci s různými nastavenými technologickými parametry v různých pozicích čidla je znázorněn na obrázcích 63 - 65. Z křivek zaznamenaných čidlem 1 umístěným u vtokového ústí lze u hladiny dotlaku 90 % pro kombinace se vstřikovací rychlostí do 100 ccm.s^{-1} a teplotou taveniny do 260°C pozorovat tlakový nárůst následovaný prudkým poklesem tlakového profilu zaznamenaným čidly 2 a 3. Na grafu je vidět, že pokles tlaku v oblasti vtoku (pozice 1) je přerušen druhou tlakovou špičkou, kdy dochází k zatuhnutí vtokového ústí. Průběh tlaku snímaný v pozicích 2 (střed tokové dráhy) a 3 (konec toku) již tento jev nevykazuje, tlak prudce klesá z maximálních hodnot na zbytkovou úroveň v čase 10-13 s. Z toho lze usuzovat, že mezi pozicemi 1 a 2 je již tavenina zatuhnutá a polymer se smršťuje. Méně výrazná sekundární tlaková špička byla zaznamenána i pro nejvyšší volenou vstřikovací rychlost 200 ccm.s^{-1} . Tlak v dutině dosáhl nulových hodnot před ukončením dotlakové fáze ve všech měřených pozicích při nastavených parametrech 90-220-100 a v pozici 2 a 3 pro parametry 100-240-20.

Parametry 90-220-100 – tlak v dutině formy klesal na nulovou hodnotu v intervalu 10 – 14,5 s. Dosažená tlaková maxima byla pro pozice 2 a 3 téměř shodná a měla hodnotou 30,1 resp. 29,1 MPa. Rovněž průběh poklesu tlaku byl pro obě pozice podobný a nulové hodnoty dosahoval v intervalu 10,5 – 11 s. Maximální tlak zaznamenaný v pozici 1 byl 32,2 MPa a klesl na nulovou hodnotu v čase 15 s. Smrštění ve směru tloušťky pro jednotlivé pozice nastávalo v čase 10,5 – 15 s.

Parametry 90-240-200 – vlivem vysoké vstřikovací rychlosti se zvyšují maximální hodnoty tlaku na 54 MPa v pozici 1 a 52 MPa resp. 51,5 MPa v pozicích 2 a 3. Na obr. je vidět nestejnoměrný pokles tlaku v místě vtokového ústí a na konci tokové dráhy, který dosahuje nulových hodnot v čase 15 – 20,4 s. Tlaková křivka zaznamenaná uprostřed dráhy toku (pozice 2) se velmi pozvolně blíží nule v čase přibližně 30 s. Tlakový profil v tomto místě prokazuje pomalejší průběh solidifikace taveniny ve středu průřezu zkušební tělesa. Smrštění ve směru tloušťky mezi jednotlivými snímanými body nastává v relativně dlouhém časovém intervalu 15 – přibližně 30 s.

Parametry 90-260-20 – Nízká vstřikovací rychlost prodlužovala dobu plnění dutiny formy, čímž se docházelo k rychlejšímu chladnutí taveniny podél dráhy toku. Maximální tlak zaznamenaný u vtokového ústí (pozice 1) byl 12,3 MPa a jeho hodnota klesala se vzrůstající vzdálenosti na hodnoty 11 MPa v pozici 2 a 10,6 MPa v pozici 3. Nulové hodnoty bylo dosaženo po prudkém tlakovém poklesu v čase 12,7 – 13,4 v pozicích 2 a 3. U vtokového ústí (pozice 1) dosáhl tlak nuly v čase 19,2 s.

Smrštění ve směru tloušťky pro jednotlivé pozice nastávalo v čase 12,7 – 19,2 s.

4.2.3 Vyhodnocení průběhu tlaku v dutině formy pro hladinu dotlaku 100 %

Průběh tlaku v dutině formy pro materiál PP Dow PPH 734-52RNA pro hladinu dotlaku 100% v kombinaci s různými nastavenými technologickými parametry v různých pozicích čidla je znázorněn na obrázcích 66 - 68. Z křivek zaznamenaných čidlem 1 umístěným u vtokového ústí lze u hladiny dotlaku 100 % pro kombinace se vstřikovací rychlostí do 100 ccm.s^{-1} a teplotou taveniny do 260°C pozorovat tlakový nárůst následovaný prudkým poklesem tlakového profilu

zaznamenaným čidly 2 a 3. Na grafu je vidět, že pokles tlaku v oblasti vtoku (pozice 1) je přerušen druhou tlakovou špičkou, kdy dochází k zatuhnutí vtokového ústí. Průběh tlaku snímáný v pozicích 2 (střed tokové dráhy) a 3 (konec toku) již tento jev nevykazuje, tlak prudce klesá z maximálních hodnot na zbytkovou úroveň v čase 11,9 – 13,5 s. Z toho lze usuzovat, že mezi pozicemi 1 a 2 již byla tavenina zatuhnutá a polymer se začal smršťovat.

Parametry 100-220-200 – Vysoká vstřikovací rychlost 200 ccm.s^{-1} snížila viskozitu taveniny a prodloužila tlakovou odezvu v dutině formy a proces solidifikace. Tlakové profily vykazovaly ve všech měřených pozicích pozvolný tlakový spád s dosažením zbytkové hodnoty v čase 16,1 s na konci tokové dráhy (pozice 3) a v čase přibližně 34 s v místě vtokového ústí. Maximální naměřené hodnoty tlaku byly v místě vtokového ústí (pozice 1) 60,7 MPa, uprostřed tokové dráhy (pozice 2) 57,7 MPa a na konci dráhy (pozice 3) 57,4 MPa.

Parametry 100-240-20 - Tlak klesl na zbytkovou hodnotu v čase 12 – 13 s ve snímáných pozicích 2 a 3. Tlakové křivky v těchto bodech klesaly strměji v důsledku rychlejšího tuhnutí taveniny vyvolaného pomalým plněním formy. Tlaková maxima pro tyto pozice byla 17,7 MPa (pozice 2) a 17,4 MPa (pozice 3). V místě vtokového ústí byl naměřen maximální tlak 19,7 MPa a po dosažení sekundární tlakové špičky prudce klesl na nulovou hodnotu v čase 17,3 s.

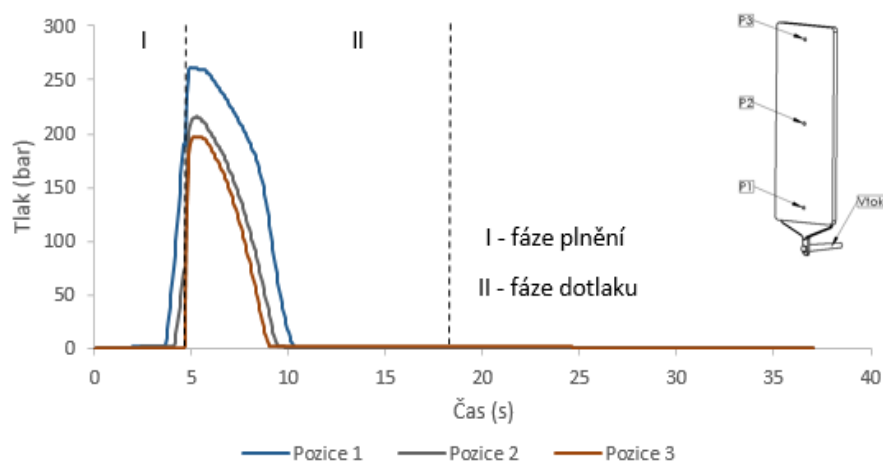
Parametry 100-260-100 – Tlakové profily měly podobný průběh jako v přechozím případě, ovšem v důsledku vyšší vstřikovací rychlosti a vyšší teploty taveniny bylo dosaženo vyšších tlaků v dutině formy. Tlaková maxima byla 30,8 MPa v místě vtokového ústí (pozice 1), 29,3 MPa ve středu dráhy (pozice 2) a 29 MPa na konci dráhy. Pokles tlaku na zbytkové hodnoty byl v čase 12 – 13,4 s v pozicích 2 a 3, v čase 17,7 s v pozici 1.

Tab. 6: Výsledky průběhu tlaku v dutině formy – materiál DOW PPH 734-52RNA

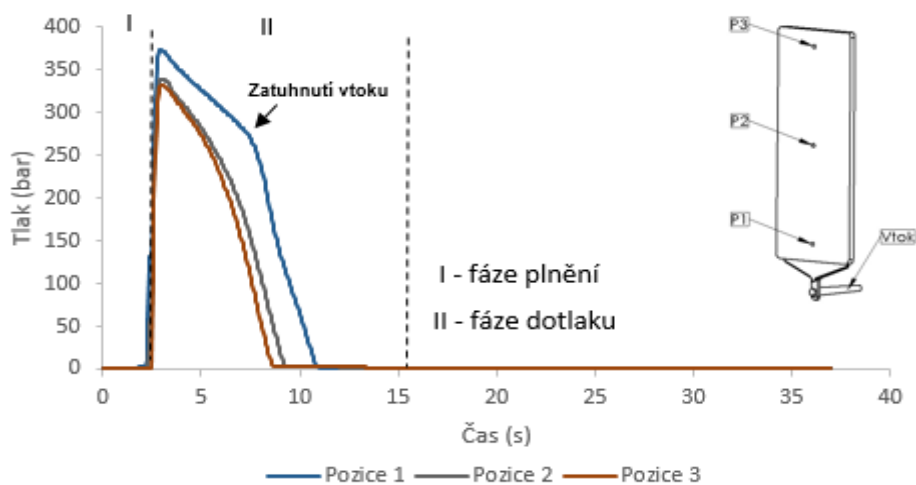
Výsledky průběhu tlaku v dutině formy (MPa)				
Materiál	Dow PPH 734-52RNA			
Parametry	Velikost dotlaku	Pozice 1	Pozice 2	Pozice 3
80-220- 20	20	16	13,5	13
80-240-100	28	26,5	24,6	24,6
80-260-200	48	46,7	45,2	44,7
90-220-100	34	32,2	30,1	29,1
90-240-200	57	54	52	51,5
90-260- 20	16	12,3	11	10,6
100-220-200	65	60,7	57,7	57,4
100-240- 20	22	19,7	17,7	17,4

100-260-100	32	30,8	29,3	29
-------------	----	------	------	----

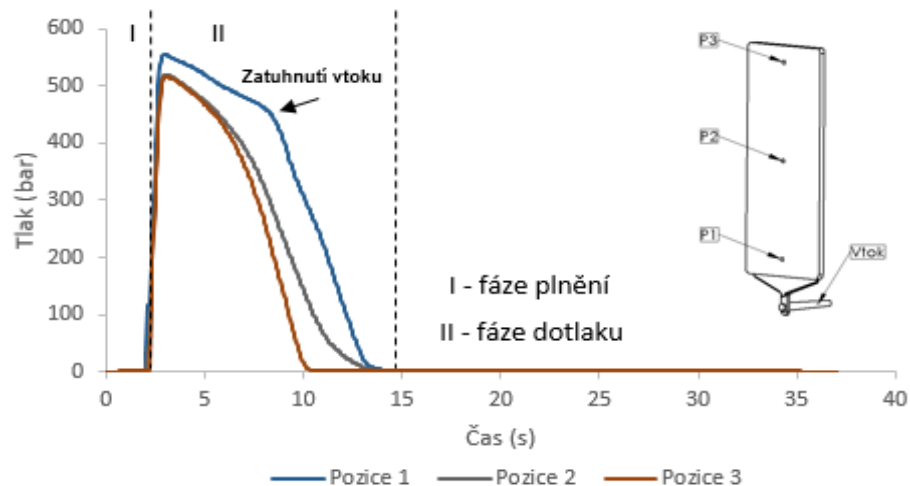
4.3 Výsledky a vyhodnocení průběhu tlaku v dutině formy pro materiál PP Scolefin 54 T 10-0



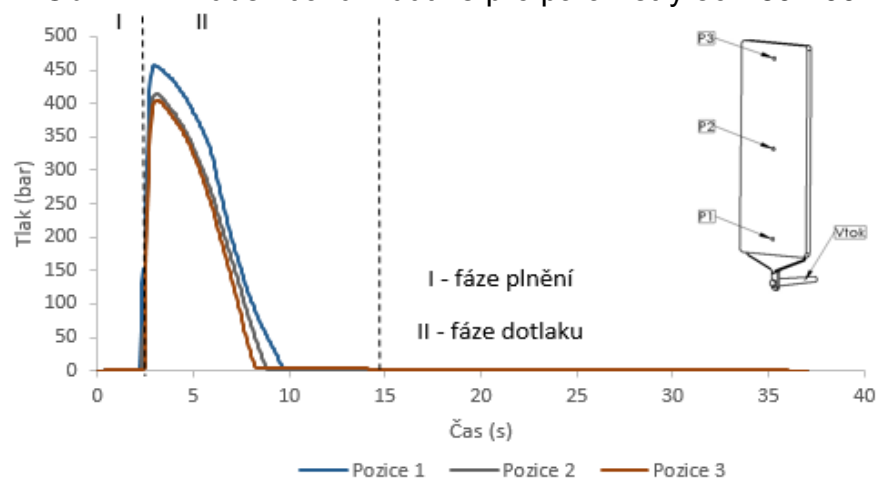
Obr. 69: Průběh tlaku v dutině pro parametry 80-220-20



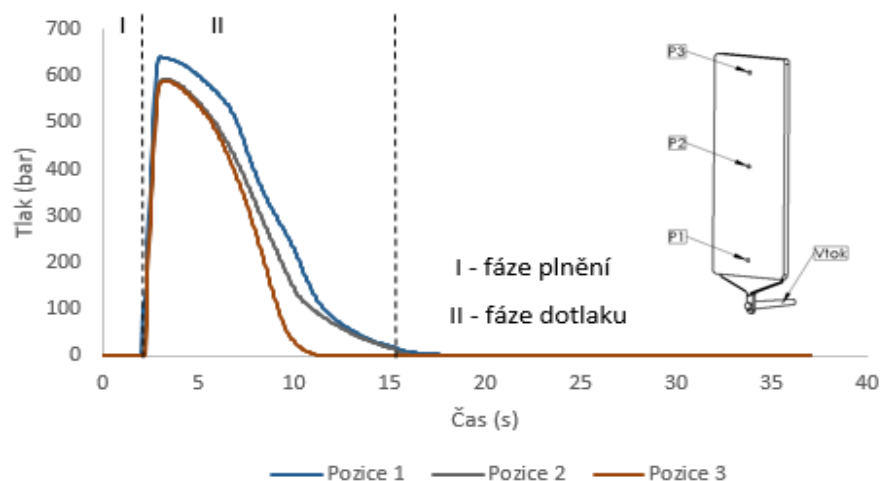
Obr. 70 : Průběh tlaku v dutině pro parametry 80-240-100



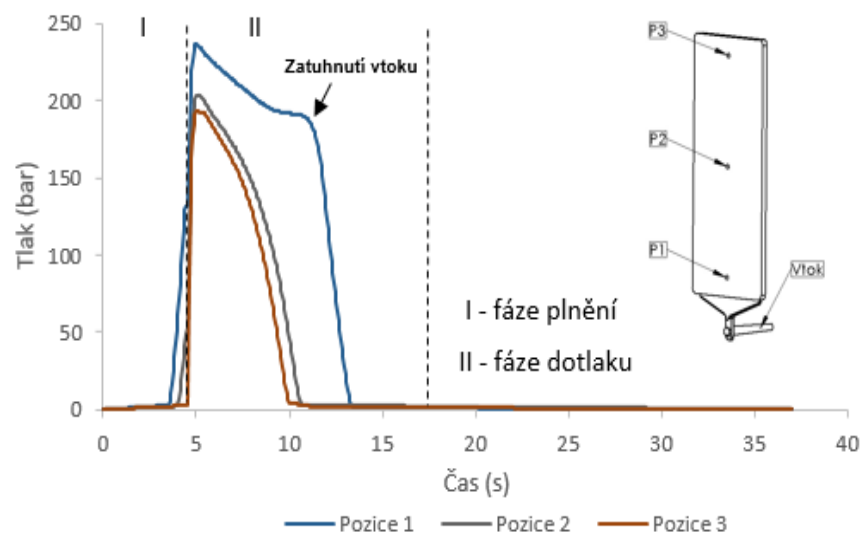
Obr. 71 : Průběh tlaku v dutině pro parametry 80-260-200



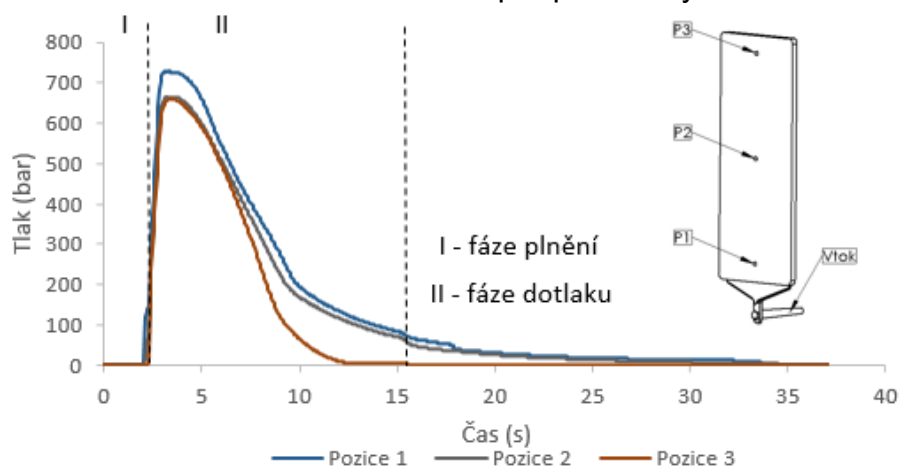
Obr. 72: Průběh tlaku v dutině pro parametry 90-220-100



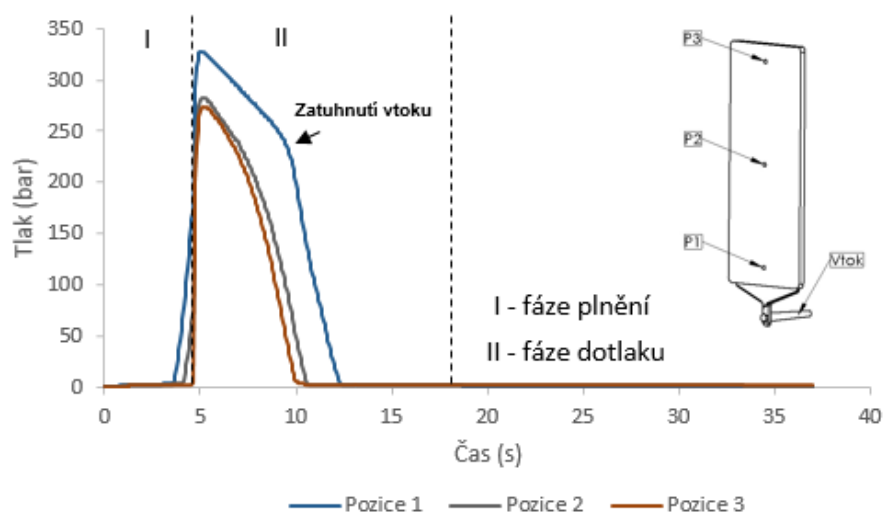
Obr. 73: Průběh tlaku v dutině pro parametry 90-240-200



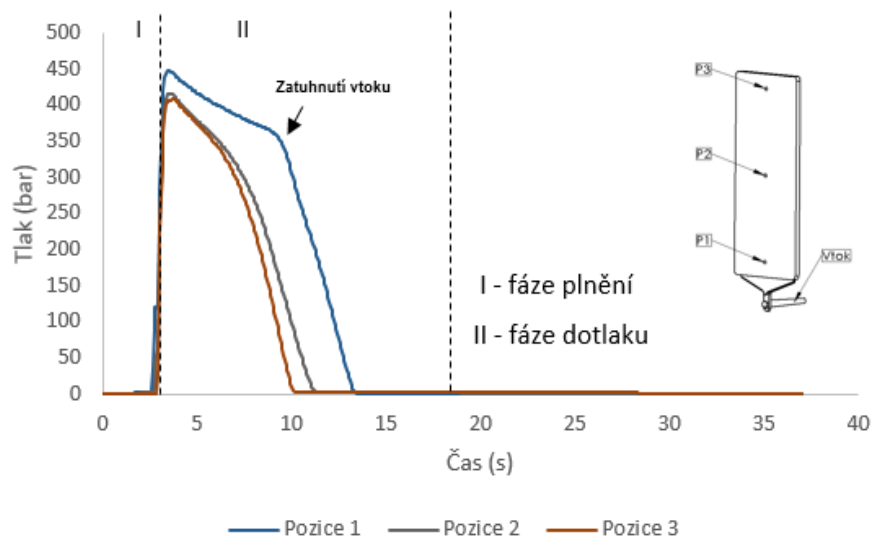
Obr. 74: Průběh tlaku v dutině pro parametry 90-260-20



Obr. 75: Průběh tlaku v dutině pro parametry 100-220-200



Obr. 76: Průběh tlaku v dutině pro parametry 100-240-20



Obr. 77: Průběh tlaku v dutině pro parametry 100-260-100

4.3.1 Vyhodnocení průběhu tlaku v dutině formy pro hladinu dotlaku 80 %

Průběh tlaku v dutině formy pro materiál PP Scolefin 54 T 10-0 pro hladinu dotlaku 80% v kombinaci s různými nastavenými technologickými parametry v různých pozicích čidla je znázorněn na obrázcích 69 - 71. Pro dostatečné naplnění dutiny formy polymerem obsahujícím 40 % minerálního plniva bylo použito vyšších vstřikovacích tlaků v komparaci s neplněným polymerem vzhledem k vyšší viskozitě taveniny. Tlakové profily vykazovaly poměrně vyrovnaný průběh u nastavovaných parametrů se vstřikovací rychlostí do 100 ccm.s^{-1} v pozicích 2 a 3. Tlak v dutině formy dosáhl zbytkových hodnot před dokončením dotlakové fáze u všech nastavených kombinací technologických parametrů.

Parametry 80-220-20 – Hodnota tlaku uvnitř dutiny formy klesla na zbytkovou hodnotu v krátkém časovém intervalu 9,1 – 10,3 s. Určení přesného bodu zatuhnutí vtokové ústí nelze z křivky jednoznačně určit vzhledem k prudkému poklesu tlaku z maximální hodnoty. Průběh tlakového profilu je ovlivněn nízkou vstřikovací rychlostí a nízkou teplotou taveniny, kdy došlo k zatuhnutí vtokového ústí v krátkém čase a zamezilo dalšímu působení dotlaku. Maximální tlak dosáhl u vtokového ústí (pozice 1) hodnoty 26,2 MPa, 21,6 MPa ve středu dráhy (pozice 2) a 19,8 MPa na konci tokové dráhy (pozice 3).

Parametry 80-240-100 – Zvýšení vstřikovací rychlosti na hodnotu 100 ccm.s^{-1} posunulo maximální tlak na hodnotu 37,4 MPa v místě vtokového ústí (pozice 1).

Maximální tlak zachycený na pozicích dvě a tři byl 33,9 resp. 33,2 MPa. Z tlakové křivky pro pozici 1 lze vidět pozvolnější tlakový spád s patrným zlomem signalizujícím zatuhnutí vtokového ústí v čase 7,5 s. Tlak v dutině dosáhl zbytkové hodnoty v čase 8,6 – 11 s.

Parametry 80-260-200 – Vliv kombinace vstřikovací rychlosti 200 ccm.s^{-1} s nejvyšší teplotou taveniny $260 \text{ }^{\circ}\text{C}$ se projevil pozvolnějším poklesem tlaku z maximálních hodnot patrným na tlakové křivce zachycené u vtokového ústí (pozice 1) až do okamžiku zatuhnutí vtokového ústí v čase 8,1 s. Maximální hodnoty tlaku dosahovaly 55,5 MPa (pozice 1), 52 MPa (pozice 2) a 51,5 (pozice 3). Z obrázku lze pozorovat mírné snížení tlakového spádu uprostřed tokové dráhy. Tento jev je pravděpodobně způsoben zpomalením solidifikačního procesu v jádru zkušebního tělesa, což posunulo dosažení zbytkové hodnoty tlaku na stejný čas 14 s naměřený v místě vtokového ústí. Tlak v dutině formy dosáhl zbytkové hodnoty v čase 10,2 – 14 s.

4.3.2 Vyhodnocení průběhu tlaku v dutině formy pro hladinu dotlaku 90 %

Průběh tlaku v dutině formy pro materiál PP Scolefin 54 T 10-0 pro hladinu dotlaku 90% v kombinaci s různými nastavenými technologickými parametry v různých pozicích čidla je znázorněn na obrázcích 72 - 74. Tlak v dutině dosáhl nulových hodnot před ukončením dotlakové fáze pro kombinace parametrů se vstřikovací rychlosti do 100 ccm.s^{-1} a teplotou taveniny do $260 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Parametry 90-220-100 – Křivky vykazují po dosažení tlakové špičky strmý spád na zbytkovou hodnotu ve všech měřených pozicích v čase 8,2 – 9,8 s. Maximální naměřené hodnoty tlaku byly v místě vtokového ústí (pozice 1) 45,7 MPa, uprostřed tokové dráhy (pozice 2) 41,5 MPa a na konci dráhy (pozice 3) 40,5 MPa.

Parametry 90-240-200 - vysoká vstřikovací rychlost měla v důsledku sekundárního zvýšení teploty taveniny a tím snížené viskozity vliv na průběh tlakových integrálů. Z křivek je patrné, že byla prodloužena tlaková odezva v dutině formy a tlak dosáhl zbytkové hodnoty v čase 11,1 – 17 s., což zvýšilo účinnost dotlaku. Proces solidifikace byl ukončen přibližně ve stejný okamžik ve středu (pozice 2) a na konci tokové dráhy (pozice 3). Maximální naměřené

hodnoty tlaku byly v místě vtokového ústí (pozice 1) 64 MPa, uprostřed tokové dráhy (pozice 2) 59,3 MPa a na konci dráhy (pozice 3) 59 MPa

Parametry 90-260-20 - vlivem nízké vstřikovací rychlosti 20 ccm.s^{-1} docházelo k rychlému tuhnutí taveniny směrem od středu (pozice 2) ke konci tokové dráhy (pozice 3) doprovázeného prudkým tlakovým poklesem. Vliv vysoké teploty taveniny se projevil u vtokového ústí, kde tlak pozvolně klesal z maxima 23,7 MPa až do okamžiku zatuhnutí vtokového ústí. Tento moment lze pozorovat na příslušné tlakové křivce ostrým zalomením tlakového spádu. Tlak v dutině formy dosáhl zbytkových hodnot v čase 10 – 13,4 s. Maximální naměřené hodnoty tlaku byly v místě vtokového ústí (pozice 1) 23,7 MPa, uprostřed tokové dráhy (pozice 2) 20,4 MPa a na konci dráhy (pozice 3) 19,4 MPa.

4.3.3 Vyhodnocení průběhu tlaku v dutině formy pro hladinu dotlaku 100 %

Průběh tlaku v dutině formy pro materiál PP Scolefin 54 T 10-0 pro hladinu dotlaku 100% v kombinaci s různými nastavenými technologickými parametry v různých pozicích čidla je znázorněn na obrázcích 75 - 77. Tlak v dutině dosáhl nulových hodnot před ukončením dotlakové fáze pro kombinace parametrů se vstřikovací rychlosti do 100 ccm.s^{-1} a teplotou taveniny do 260°C .

Parametry 100-220-200 – vliv vyšší hladiny dotlaku v kombinaci s vysokou vstřikovací rychlostí 200 ccm.s^{-1} a nižší teplotou taveniny 220°C se projevil širokým časovým intervalem 12 – 35 s, v němž bylo dosaženo zbytkových hodnot tlaku v jednotlivých pozicích. Důsledkem nízké hodnoty nastaveného parametru teploty taveniny se zrychlila solidifikace povrchové vrstvy, což vyvolalo strmější pokles tlakového profilu. Vlivem vysoké vstřikovací rychlosti však došlo k sekundárnímu ohřevu taveniny, která prodloužila dobu tuhnutí v jádru zkušebního tělesa. Tento jev je zachycen v průběhu tlakových křivek pro pozice 2 a 3. Maximální naměřené hodnoty tlaku byly v místě vtokového ústí (pozice 1) 72,9 MPa, uprostřed tokové dráhy (pozice 2) 66,5 MPa a na konci dráhy (pozice 3) 66 MPa.

Parametry 100-240-20 – tlak v dutině formy klesal na nulovou hodnotu v čase 10 – 12,4 s. Tlakové profily mají poměrně vyrovnaný charakter, na pozicích 2 a 3 následuje po dosažení tlakové špičky prudký tlakový pokles. Účinnější působení dotlaku lze pozorovat z průběhu tlaku na pozici 1 s patrným zlomem signalizujícím

zatuhnutí vtoku. Maximální naměřené hodnoty tlaku byly v místě vtokového ústí (pozice 1) 32,8 MPa, uprostřed tokové dráhy (pozice 2) 28,2 MPa a na konci dráhy (pozice 3) 27,4 MPa.

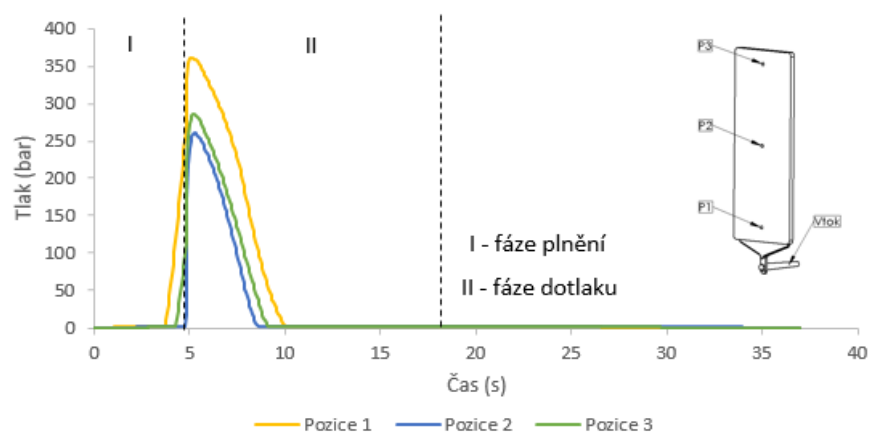
Parametry 100-260-100 – Tlakové profily mají podobnou charakteristiku jako v předchozím případě (100-240-20). Vlivem vyšší vstřikovací rychlosti a teploty taveniny došlo ke snížení viskozity taveniny a tím k zlepšení tlakového přenosu a účinnosti dotlaku. Vyšší hodnoty vykazovaly i maximální naměřené tlaky ve všech monitorovaných bodech - v místě vtokového ústí (pozice 1) 44,8 MPa, uprostřed tokové dráhy (pozice 2) 41,7 MPa a na konci dráhy (pozice 3) 40,8 MPa. Tlak v dutině formy klesl na zbytkové hodnoty v čase 11,7 – 13,5 s.

Tab. : 7 Výsledky průběhu tlaku v dutině formy – materiál PP Scolefin 54 T 10-0

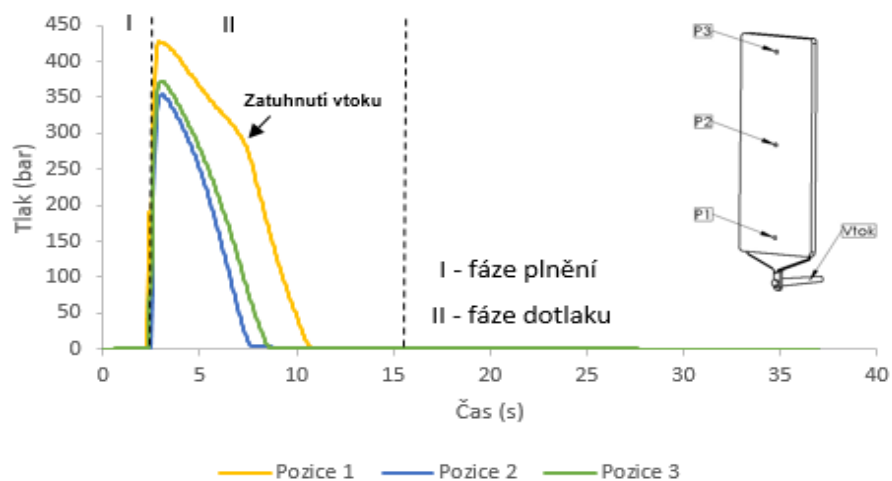
Výsledky průběhu tlaku v dutině formy (MPa)				
Materiál	PP Scolefin 54 T 10-0			
Parametry	Velikost dotlaku	Pozice 1	Pozice 2	Pozice 3
80-220- 20	37	26,2	21,6	19,8
80-240-100	44	37,4	33,9	33,2
80-260-200	75	55,5	52	51,5
90-220-100	56	45,7	41,5	40,5

90-240-200	82	64	59,3	59
90-260- 20	31	23,7	20,4	19,4
100-220-200	87	72,9	66,5	66
100-240- 20	41	32,8	38,2	27,4
100-260-100	52	44,8	41,7	40,8

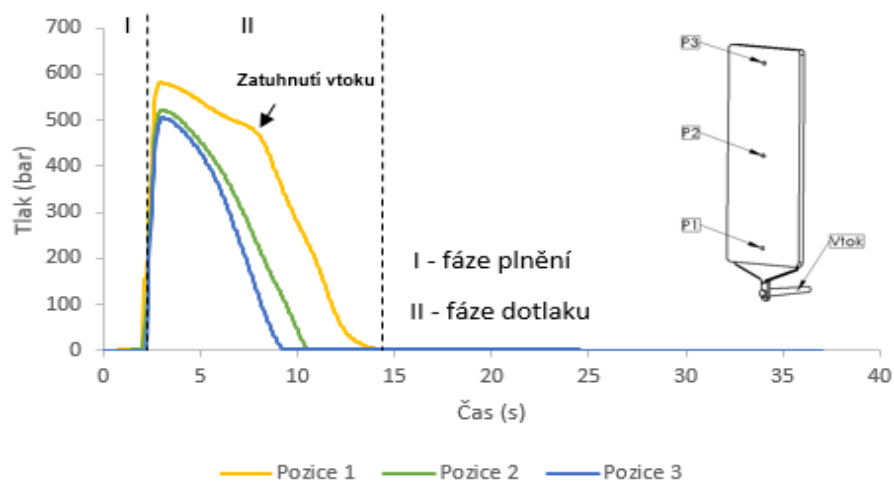
4.4 Výsledky a vyhodnocení průběhu tlaku v dutině formy pro materiál PP Scofelin 34 G 10-0



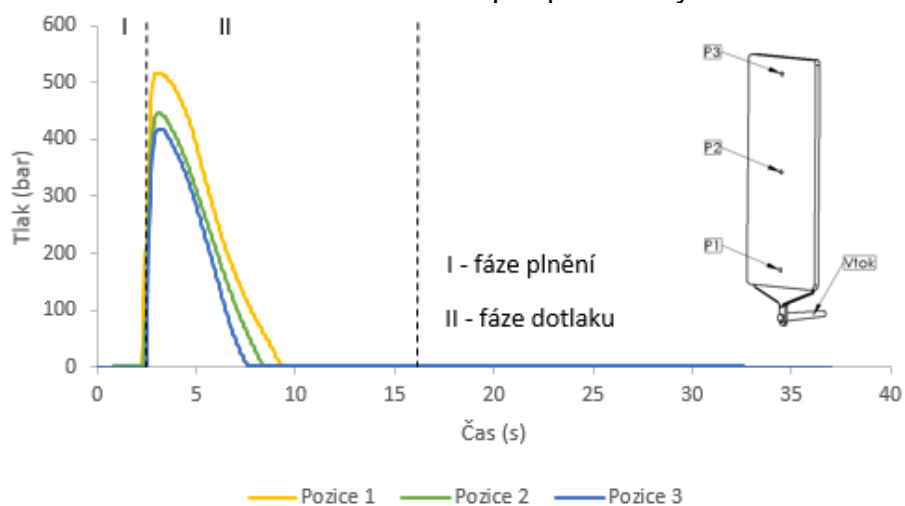
Obr. 78: Průběh tlaku v dutině pro parametry 80-220-20



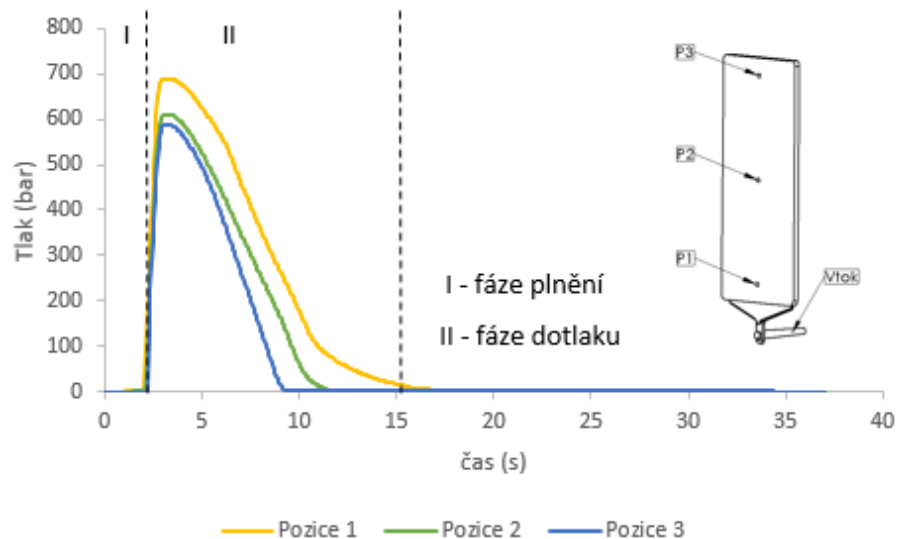
Obr. 79: Průběh tlaku v dutině pro parametry 80-240-100



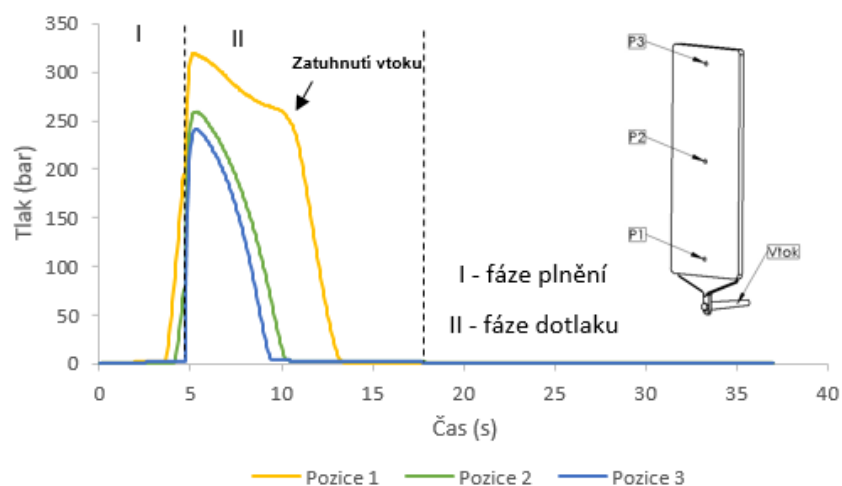
Obr. 80: Průběh tlaku v dutině pro parametry 80-260-200



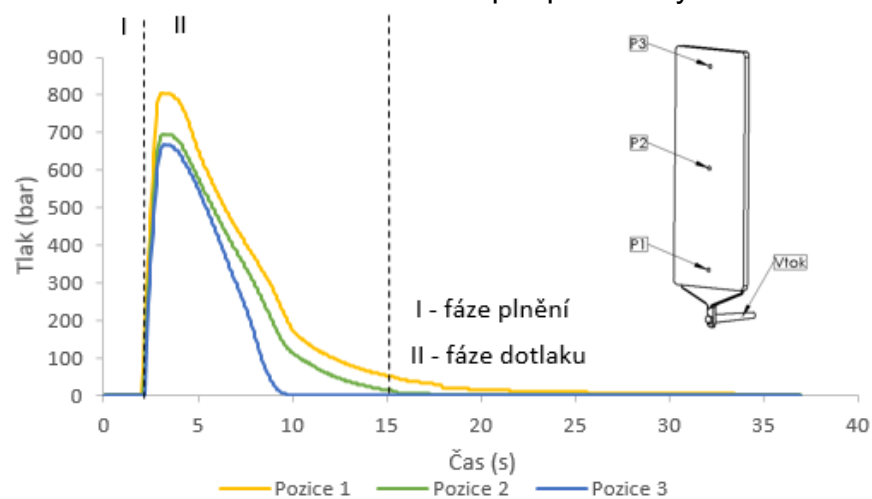
Obr. 81: Průběh tlaku v dutině pro parametry 90-220-100



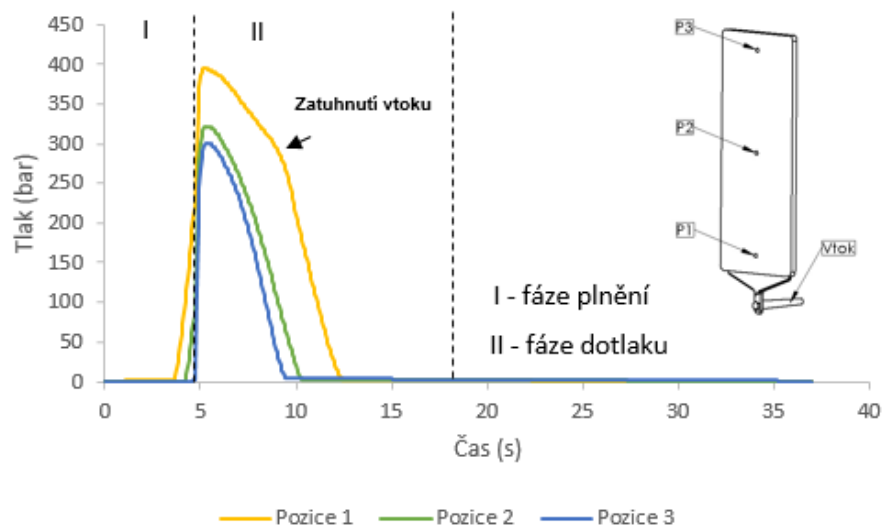
Obr. 82: Průběh tlaku v dutině pro parametry 90-240-200



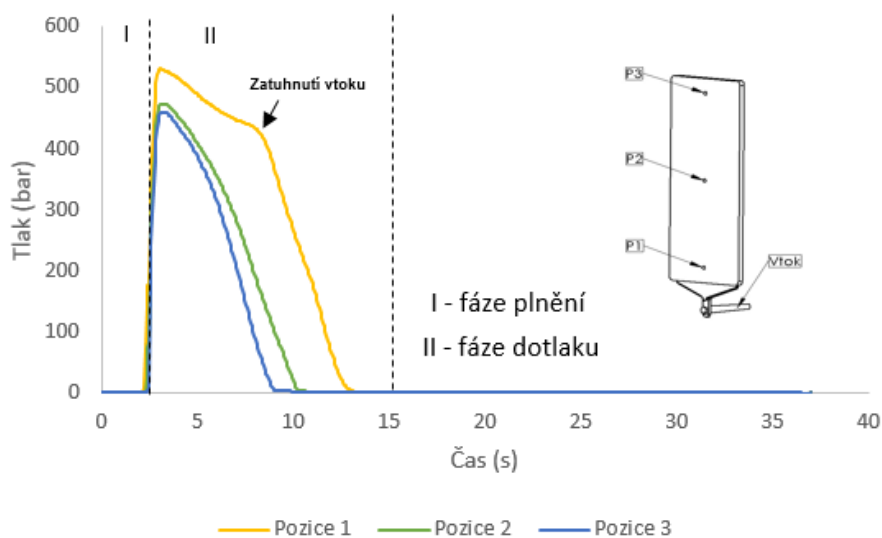
Obr. 83: Průběh tlaku v dutině pro parametry 90-260-20



Obr. 84: Průběh tlaku v dutině pro parametry 100-220-200



Obr. 85: Průběh tlaku v dutině pro parametry 100-240-20



Obr. 86: Průběh tlaku v dutině pro parametry 100-260-100

4.4.1 Vyhodnocení průběhu tlaku v dutině formy pro hladinu dotlaku 80 %

Průběh tlaku v dutině formy pro materiál PP Scolefin 34 G 10-0 pro hladinu dotlaku 80% v kombinaci s různými nastavenými technologickými parametry v různých pozicích čidla je znázorněn na obrázcích 78 – 80. Pro dostatečné naplnění dutiny formy polymerem obsahujícím 40 % skleněných vláken bylo použito vyšších vstřikovacích tlaků v komparaci s neplněným polymerem vzhledem k vyšší viskozitě taveniny. Tlak v dutině formy dosáhl nulových hodnot před dokončením dotlakové fáze u všech nastavených kombinací technologických parametrů

Parametry 80-220-20 – na tlakových křivkách je patrný ostrý tlakový pokles z maximálních hodnot na všech monitorovaných pozicích. Zbytkový tlak byl dosažen v krátkém časovém intervalu 8,5 – 10,7 s. U vtokového ústí (pozice 1) byl naměřen maximální tlak 36,1 MPa, ve středu dráhy toku (pozice 2) 28,5 MPa a na konci dráhy (pozice 3) 26 MPa. Strmý pokles tlakové křivky v pozici 1 z maximální hodnoty naznačuje rychlé zatuhnutí vtoku a tím omezení působení dotlaku po celé dráze toku.

Parametry 80-240-100 – Vyšší vstřikovací rychlost 100 ccm.s^{-1} v kombinaci s teplotou taveniny 240°C zvýšila tlakový přenos do dutiny formy na maximální hodnotu 42,7 MPa naměřenou u vtokového ústí (pozice 1). Vlivem zvýšení těchto dvou parametrů se snížila viskozita taveniny a tím zlepšila tlaková odezva v dutině formy, což se projevilo i na tlakovém profilu zachyceném u vtoku. Se vzrůstající vzdáleností od vtoku klesal na maximální hodnoty 37,3 MPa v pozici 2 a 35,4 MPa na pozici 3. Tlak dosáhl zbytkových hodnot v čase 7,8 – 10,7 s.

Parametry 80-260-200 – Tlakové profily pro maximální nastavené parametry na hladině dotlaku 80% vykazují pozvolnější pokles tlaku patrný především u vtokového ústí (pozice 1). Maximální zachycené hodnoty tlaků v dutině byly 58,1 MPa (pozice 1), 52,1 MPa (pozice 2) a 44,7 MPa (pozice 3). Pokles tlaku na zbytkovou hodnotu byl v čase 9,2 – 14,2 s.

4.4.2 Vyhodnocení průběhu tlaku v dutině formy pro hladinu dotlaku 90 %

Průběh tlaku v dutině formy pro materiál PP Scolefin 34 G 10-0 pro hladinu dotlaku 90% v kombinaci s různými nastavenými technologickými parametry v různých pozicích čidla je znázorněn na obrázcích 81 - 83.

Parametry 90-220-100 – Na tlakových křivkách je patrný rychlý pokles tlaku po celé dráze toku taveniny s dosaženou zbytkovou hodnotou v čase 7,5 – 9,4 s. Je tedy zřejmé, že účinná doba dotlaku byla značně redukována. Maximální naměřené hodnoty tlaku byly v místě vtokového ústí (pozice 1) 52 MPa, uprostřed tokové dráhy (pozice 2) 44,6 MPa a na konci dráhy (pozice 3) 41,9 MPa.

Parametry 90-240-200 – Tlakové profily mají podobný průběh jako v předchozím případě. Vyšší teplota taveniny v kombinaci s vyšší vstřikovací rychlostí měla za následek pomalejší proces solidifikace v izolovaném jádru zkušebního tělesa, což se projevilo velmi pozvolným tlakovým poklesem na

zbytkovou hodnotu naměřenou na pozici 1. Maximální naměřené hodnoty tlaku byly v místě vtokového ústí (pozice 1) 68,8 MPa, uprostřed tokové dráhy (pozice 2) 61 MPa a na konci dráhy (pozice 3) 58,9 MPa. Tlak klesl na zbytkovou hodnotu v čase 9,8 – 16,8s.

Parametry 90-260-20 - vlivem nízké vstřikovací rychlosti 20 ccm.s^{-1} docházelo k rychlému tuhnutí taveniny směrem od středu (pozice 2) ke konci tokové dráhy (pozice 3) doprovázeného prudkým tlakovým poklesem. U vtokového ústí je patrný pozvolný pokles tlaku až do bodu zatuhnutí vtoku, což naznačuje maximální účinnost dotlaku v této pozici. Tlak v dutině formy dosáhl zbytkových hodnot v čase 9,8 – 13,3 s. Maximální naměřené hodnoty tlaku byly v místě vtokového ústí (pozice 1) 31,2 MPa, uprostřed tokové dráhy (pozice 2) 25,9 MPa a na konci dráhy (pozice 3) 24,1 MPa.

4.4.3 Vyhodnocení průběhu tlaku v dutině formy pro hladinu dotlaku 100 %

Průběh tlaku v dutině formy pro materiál PP Scolefin 34 G 10-0 pro hladinu dotlaku 100% v kombinaci s různými nastavenými technologickými parametry v různých pozicích čidla je znázorněn na obrázcích 84 – 86.

Parametry 100-220-200 – Tlakové profily mají podobný průběh ve všech sledovaných pozicích, kdy po dosažení tlakové špičky následuje prudký tlakový pokles. Na pozicích 1 a 2 lze pozorovat zmírnění tlakového poklesu v čase přibližně 10 s, pravděpodobně způsobené zpomalením chladnutí taveniny v izolovaném jádru zkušebního tělesa po zatuhnutí vtoku. Maximální naměřené hodnoty tlaku byly v místě vtokového ústí (pozice 1) 80,3 MPa, uprostřed tokové dráhy (pozice 2) 69,5 MPa a na konci dráhy (pozice 3) 66,9 MPa. Tlak v dutině formy klesl na zbytkové hodnoty v čase 9,8 – 32,5 s.

Parametry 100-240-20 – Tlakové profily mají poměrně vyrovnaný charakter, na pozicích 2 a 3 následuje po dosažení tlakové špičky prudký tlakový pokles. Na tlakových profilech je možno pozorovat vyšší rozdíl v maximální dosažené hodnotě tlaku v mezi pozicemi 1 a 3. Na tlakovém průběhu v pozici 1 je patrný zlom v čase přibližně 9 s, kdy došlo k zatuhnutí vtoku. Maximální naměřené hodnoty tlaku byly v místě vtokového ústí (pozice 1) 39,6 MPa, uprostřed tokové dráhy (pozice 2) 32,2 MPa a na konci dráhy (pozice 3) 30,1 MPa. Tlak v dutině formy klesl na zbytkové hodnoty v čase 9,5 – 10,3 s.

Parametry 100-260-100 – Na tlakových profilech je patrný vliv nejvýše nastavené teploty taveniny 260°C v kombinaci se vstřikovací rychlostí 100 ccm.s⁻¹ mírně prodlužující dobu dotlaku. K zatuhnutí vtoku došlo v čase 8 s. Maximální naměřené hodnoty tlaku byly v místě vtokového ústí (pozice 1) 53,1 MPa, uprostřed tokové dráhy (pozice 2) 47,4 MPa a na konci dráhy (pozice 3) 46 MPa. Tlak v dutině formy klesl na zbytkové hodnoty v čase 9,2 – 13,2 s.

Tab. : 8 Výsledky průběhu tlaku v dutině formy – materiál PP Scolefin 34 G 10-0

Výsledky průběhu tlaku v dutině formy (MPa)	
Materiál	PP Scolefin 34 G 10-0

Parametry	Velikost dotlaku	Pozice 1	Pozice 2	Pozice 3
80-220- 20	49	36,1	28,5	26
80-240-100	55	42,7	37,3	35,4
80-260-200	70	58,1	52,1	44,7
90-220-100	68	52	44,6	41,9
90-240-200	85	68,8	61	58,9
90-260- 20	44	31,2	25,9	24,1
100-220-200	102	80,3	69,5	66,9
100-240- 20	54	39,6	32,2	30,1
100-260-100	65	53,1	47,4	46

Tab. : 9 Porovnání průběhu tlaku v dutině formy pro jednotlivé typy materiálu

Výsledky průběhu tlaku v dutině formy (MPa)					
Parametry	Materiál	Velikost dotlaku	Pozice 1	Pozice 2	Pozice 3
80-220- 20	Dow PPH 734-52RNA	20	16	13,5	13
	PP Scolefin 54 T 10-0	37	26,2	21,6	19,8
	PP Scolefin 34 G 10-0	49	36,1	28,5	26
80-240-100	Dow PPH 734-52RNA	28	26,5	24,6	24,6

	PP Scolefin 54 T 10-0	44	37,4	33,9	33,2
	PP Scolefin 34 G 10-0	55	42,7	37,3	35,4
80-260-200	Dow PPH 734-52RNA	48	46,7	45,2	44,7
	PP Scolefin 54 T 10-0	75	55,5	52	51,5
	PP Scolefin 34 G 10-0	70	58,1	52,1	44,7
90-220-100	Dow PPH 734-52RNA	34	32,2	30,1	29,1
	PP Scolefin 54 T 10-0	56	45,7	41,5	40,5
	PP Scolefin 34 G 10-0	68	52	44,6	41,9
90-240-200	Dow PPH 734-52RNA	57	54	52	51,5
	PP Scolefin 54 T 10-0	82	64	59,3	59
	PP Scolefin 34 G 10-0	85	68,8	61	58,9
90-260- 20	Dow PPH 734-52RNA	16	12,3	11	10,6
	PP Scolefin 54 T 10-0	31	23,7	20,4	19,4
	PP Scolefin 34 G 10-0	44	31,2	25,9	24,1
100-220-200	Dow PPH 734-52RNA	65	60,7	57,7	57,4
	PP Scolefin 54 T 10-0	87	72,9	66,5	66
	PP Scolefin 34 G 10-0	102	80,3	69,5	66,9
100-240- 20	Dow PPH 734-52RNA	22	19,7	17,7	17,4
	PP Scolefin 54 T 10-0	41	32,8	38,2	27,4
	PP Scolefin 34 G 10-0	54	39,6	32,2	30,1
100-260-100	Dow PPH 734-52RNA	32	30,8	29,3	29
	PP Scolefin 54 T 10-0	52	44,8	41,7	40,8
	PP Scolefin 34 G 10-0	65	53,1	47,4	46

5. VÝSLEDKY A VYHODNOCENÍ LOKÁLNÍHO, PODELNÉHO A PŘÍČNÉHO VÝROBNÍHO SMRŠTĚNÍ VÝSTŘÍKŮ

V této kapitole je zkoumán vliv kombinace vstřikovacích parametrů na lokální, příčné a podélné smrštění. Analogicky s předchozí kapitolou jsou nastavované kombinace zkoumaných technologických parametrů uváděny v následujícím pořadí:

Dotlak [%] – Teplota taveniny [°C] – Vstřikovací rychlost [$\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$].

V tabulkách byly vzhledem k redukci velkého množství dat použity pouze aritmetické průměry z každých deseti naměřených hodnot smrštění na jednotlivých

zkušebních tělesech. Ke každé jednotlivé průměrné hodnotě smrštění je uvedena příslušná směrodatná odchylka σ souboru naměřených dat.

Tyto výsledky jsou následně vyhodnoceny statistickou analýzou plánovaného experimentu typu DOE, sestaveného s cílem vyhodnocení vlivu tří technologických faktorů na pět sledovaných proměnných (viz tab. 10), charakterizujících kvalitu výstřiku, vyráběného na vstřikovacím lisu.

5.1 Data a typ výzkumných činností

V prvním kroku byly všechny důležité proměnné provedeného experimentu sestaveny do tabulek. Rozlišujeme proměnné, charakterizující kvalitu procesu (tzv. sledované proměnné) a proměnné ovlivňující samotný proces (tzv. faktory).

5.1.1 Sledované proměnné

Požadovaná rozměrová stabilita je charakterizována pomocí 5 sledovaných proměnných (tab. 10).

Tab. 10: Výstupní (sledované) proměnné

Proměnná	Označení	Jednotka
Smrštění v podélném směru	S_{Mp}	mm
Smrštění v příčném směru	S_{Mn}	mm
Smrštění tloušťky v pozici 1	S_{b1}	mm
Smrštění tloušťky v pozici 2	S_{b2}	mm
Smrštění tloušťky v pozici 3	S_{b3}	mm

5.1.2 Faktory

Z množiny technologických faktorů, které potenciálně ovlivňují hodnoty sledovaných proměnných, byly určeny tři dominantní faktory (tab. 11 tab.).

Tab. 11: Faktory a úrovně experimentu

Faktor	Jednotka	Dolní úroveň	Střední úroveň	Horní úroveň
Dotlak	%	80	90	100
Teplota taveniny	°C	220	240	260
Vstřikovací rychlost	$\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	20	100	200

5.1.3 Statistická analýza

Vyhodnocení výsledků celého experimentu bylo provedeno ve zkušební 30denní verzi programu Statgraphics Centurion XVI. U testování byla použita standardní hladina významnosti $\alpha = 0.05$.

Statistické vyhodnocení výsledků sleduje 2 základní cíle:

- 1) Určit jaký vliv má každý z 3 uvažovaných faktorů na každou z 5 sledovaných proměnných, tzn. vyhodnotit vliv dotlaku, teploty taveniny a vstřikovací rychlosti na smrštění v podélném směru, smrštění v příčném směru a smrštění tloušťky v bodech 1 až 3.
- 2) Určit jaké je optimální nastavení 3 uvažovaných faktorů pro dosažení co nejlepších výsledků v procesu výroby výlisků, tzn. pro dosažení minimálních hodnot všech parametrů smrštění. Vzhledem k tomu, že v řadě pokusů byly zjištěny záporné hodnoty smrštění (zvětšení rozměru), je v těchto případech uvažována cílová hodnota smrštění nula.

5.1.4 Typ experimentu

Byla zvolena tzv. Taguchiho verze ortogonálního plánu (viz. Kapitola 4.1) – zvolené 3 faktory na 3 úrovních byly kombinovány do 9 pokusů, přičemž každý pokus byl realizován celkem třikrát (1 pokus pro každý ze tří uvažovaných materiálů). Celkový počet pokusů je tedy 27.

Experiment byl vyhodnocen s ohledem na průměrnou hodnotu sledovaných proměnných. Taguchiho kritérium S/N v tomto případě nelze vyhodnotit, každé nastavení faktorů a materiálu v 27 experimentech je jedinečné, nelze vyhodnocovat variabilitu sledovaných proměnných. Pro statistické vyhodnocení byly použity naměřené hodnoty z tabulek 12; 28; 44.

5.2 Výsledky a vyhodnocení lokálního, podélného a příčného výrobního smrštění výstřiků pro materiál Dow PPH 734- 52RNA

V následující tabulce a grafech jsou popsány naměřené hodnoty lokálního, podélného a příčného smrštění zkušebních těles vyrobených z materiálu Dow PPH 734- 52RNA.

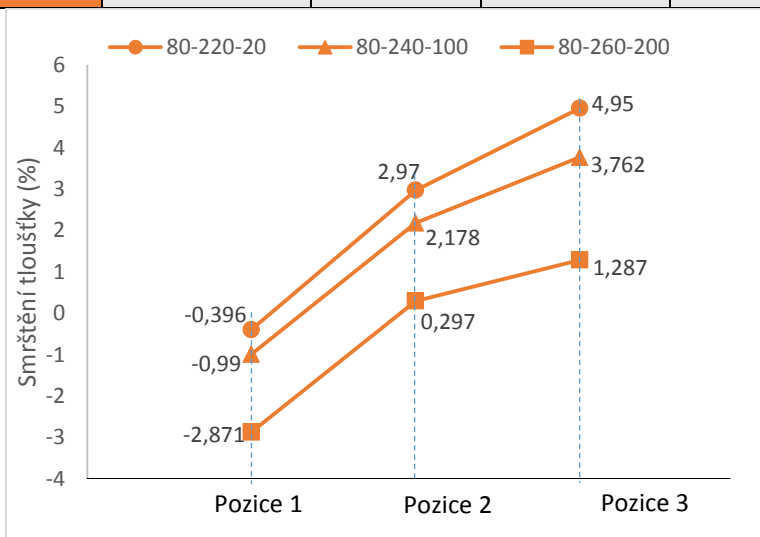
Tab. 12: Lokální, příčné a podélné výrobní smrštění- materiál Dow PPH 734- 52RNA

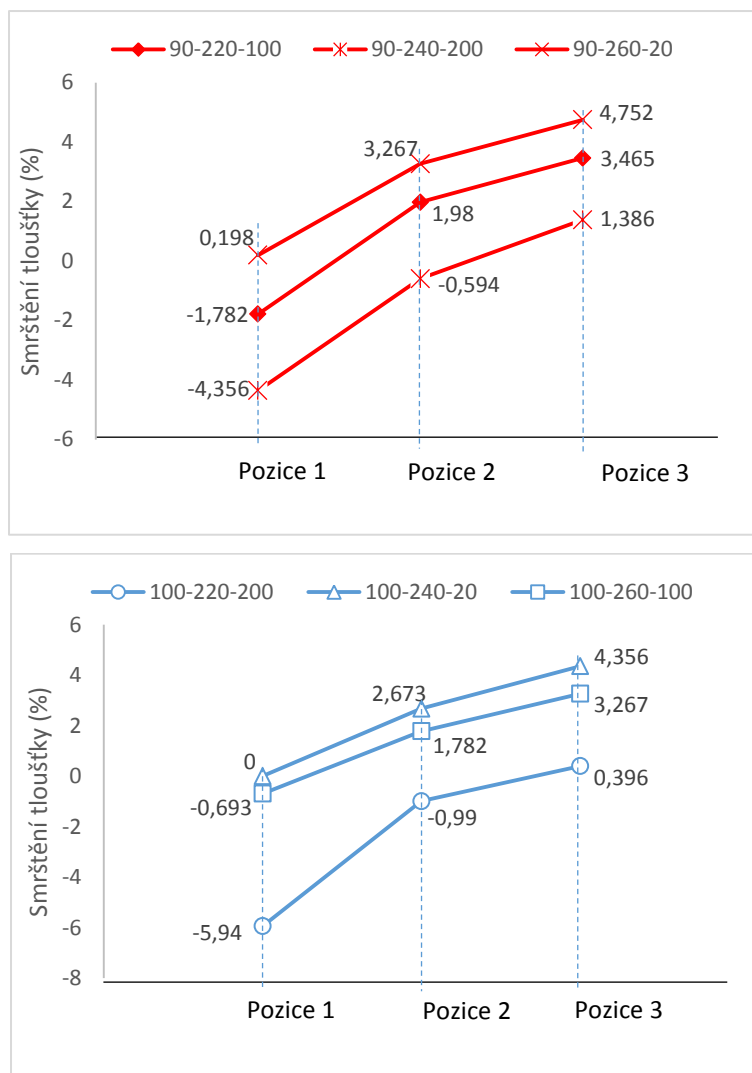
Lokální výrobní smrštění (%)						
Materiál	Dow PPH 734-52RNA					
Parametry	S_{b1}	σ	S_{b2}	σ	S_{b3}	σ

80-220- 20	-0,396	0,073	2,970	0,059	4,950	0,079
80-240-100	-0,990	0,062	2,178	0,036	3,762	0,097
80-260-200	-2,871	0,067	0,297	0,068	3,762	0,051
90-220-100	-1,782	0,073	1,980	0,039	3,465	0,049
90-240-200	-4,356	0,154	-0,594	0,071	1,386	0,086
90-260- 20	0,198	0,044	3,267	0,049	4,752	0,036
100-220-200	-5,94	0,132	-0,99	0,034	0,396	0,081
100-240- 20	0	0,054	2,673	0,092	4,356	0,060
100-260-100	-0,693	0,078	1,782	0,070	3,267	0,089

Příčné a podélné výrobní smrštění (%)

Materiál	Dow PPH 734-52RNA			
Parametry	S_{Mp}	σ	S_{Mn}	Σ
80-220- 20	1,600	0,089	1,591	0,067
80-240-100	1,291	0,064	1,362	0,023
80-260-200	1,122	0,069	1,056	0,055
90-220-100	1,310	0,039	1,264	0,076
90-240-200	1,011	0,093	0,985	0,039
90-260- 20	1,021	0,069	1,211	0,061
100-220-200	0,987	0,052	0,911	0,030
100-240- 20	1,519	0,063	1,532	0,099
100-260-100	1,324	0,089	1,298	0,073





Obr. 87: Graf lokálního výrobního smrštění tloušťky pro jednotlivé kombinace parametrů - Dow PPH 734-52RNA

5.2.1 Výsledky lokálního smrštění

Naměřené lokální smrštění v jednotlivých kontrolovaných pozicích v různé vzdálenosti od vtokového ústí mělo směrem k nejvzdálenějšímu místu od vtoku rostoucí charakter u všech kombinací nastavovaných technologických parametrů. Negativní smrštění Sb_1 (zvětšení rozměru) bylo naměřeno pro všechny kombinace technologických parametrů s volenou hladinou dotlaku 80 % v rozmezí od -2,871 do -0,396 % dále při nastavovaných parametrech 90-220-100 (-1,782%); 90-240-200 (-4,356 %); 100-260-100 (-0,693 %) a 100-220-200 (-5,94%). Záporné hodnoty smrštění Sb_2 byly zjištěny pro parametrické kombinace 90-240-200 (-0,594%) a 100-220-200 (-0,99%).

Nejvyšší hodnota lokálního smrštění tloušťky Sb_1 (0,198%) a Sb_2 (3,267%) byla naměřena při parametrech 90-260-20, Sb_3 (4,950%) při parametrech 80-220-20. Nejnižší nezáporná hodnota lokálního smrštění tloušťky Sb_1 (0%) byla naměřena při parametrech 100-240-20, Sb_2 (1,782%) při parametrech 100-260-100 a Sb_3 (0,396%) při parametrech 100-220-200.

5.2.2 Výsledky podélného a příčného smrštění

Pro všechny kombinace nastavovaných technologických nebyla prokázána významná anizotropie. Nejvyšší hodnota podélného i příčného smrštění byla naměřena pro kombinace parametrů 80-220-20 ($S_{Mp} = 1,600\%$; $S_{Mn} = 1,591\%$). Nejmenší výrobní smrštění jak v podélném, tak v příčném směru ($S_{Mp} = 0,987\%$; $S_{Mn} = 0,911\%$) bylo zjištěno při nastavených parametrech 100-220-200.

5.2.3 Vyhodnocení naměřených výsledků statistickou analýzou plánovaného experimentu typu DOE pro materiál Dow PPH 734- 52RNA

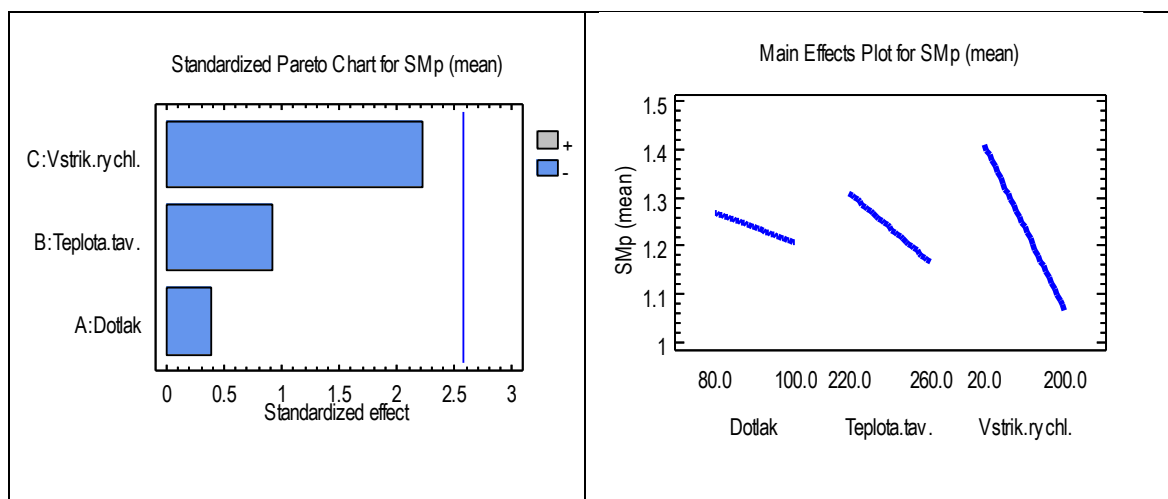
5.2.3.1 Vliv technologických parametrů na lineární smrštění v podélném směru S_{Mp}

V prvním kroku byl vyhodnocen vliv dotlaku, teploty taveniny a vstřikovací rychlosti na lineární smrštění v podélném směru u materiálu Dow PPH 734-52RNA. Výsledky analýzy rozptylu dat a modelu experimentu jsou uvedeny v tab. 14:

Tab. 14: Výsledky analýzy rozptylu dat a modelu experimentu

Analysis of Variance for S_{Mp} (mean)					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
A:Dotlak	0.0055815	1	0.0055815	0.15	0.7128
B:Teplota.tav.	0.0308167	1	0.0308167	0.84	0.4018
C:Vstrik.rychl.	0.180168	1	0.180168	4.90	0.0777
Total error	0.183698	5	0.0367395		
Total (corr.)	0.400264	8			

Vliv uvažovaných parametrů je dále posouzen pomocí grafů:



Obr. 88: Paretův graf vlivu parametrů (vlevo) a graf hlavních efektů parametrů (vpravo)

Paretův graf ukazuje vliv jednotlivých parametrů na hodnoty smrštění v podélném směru, kdy vlivnost parametru je úměrná délce úsečky a svislá modrá čára představuje hladinu významnosti pro $\alpha = 0.05$. Z grafu vyplývá:

- nejsilnější vliv (nejdelší úsečka) je patrný u parametru vstřikovací rychlost (nejblíže hranici statistické významnosti)
- výrazně slabší (a rovněž statisticky nevýznamný) vliv je patrný u dvojice parametrů teplota taveniny a dotlak

- všechny 3 parametry snižují (modrá barva) hodnoty sledované proměnné – S_{Mp} , tedy smrštění v podélném směru

Obdobné závěry jsou patrné z grafu hlavních efektů parametrů (Obr. 88).

- z dílčích grafů (úseček) je zřejmé, že největší vliv má parametr vstřikovací rychlost, úsečka má větší sklon (směrnici) a vliv na sledovanou proměnnou
- úsečky parametrů teplota taveniny a dotlak vykazují malý sklon, mají malý vliv na sledovanou proměnnou

Optimální nastavení všech tří parametrů pro dosažení požadovaného výsledku – minimální hodnoty smrštění v podélném směru, je uvedeno v tab. 14. Doporučené hodnoty byly stanoveny s ohledem na minimální průměrnou hodnotu smrštění v podélném směru.

Tab. 14: Optimální nastavení parametrů

Optimize Response			
Goal: minimize S_{Mp} (mean)			
Optimum value = 0.961293			
Factor	Low	High	Optimum
A: Dotlak	80.0	100.0	100.0
B: Teplota taveniny	220.0	260.0	260.0
C: Vstřikovací rychlost	20.0	200.0	200.0

Z tab. 14 je zřejmé, že minimální hodnoty smrštění v podélném směru S_{Mp} výlisek dosáhne při maximálních hodnotách dotlaku (100 %), maximální teplotě taveniny (260 °C) a maximální vstřikovací rychlosti (200 ccm.s⁻¹). Při takovém nastavení parametrů bude hodnota smrštění v podélném směru dosahovat průměrné hodnoty 0.96.

V tab. 15 jsou k dispozici vypočtené hodnoty regresních koeficientů a výsledná rovnice, popisující závislost smrštění v podélném směru na dotlaku, teplotě taveniny a vstřikovací rychlosti.

Tab. 15: Regresní koeficienty výsledného modelu

Regression coeffs. for S_{Mp} (mean)	
Coefficient	Estimate
constant	2.58223
A:Dotlak	-0.00305
B:Teplota taveniny	-0.00358333
C:Vstřikovací rychlost	-0.00192145

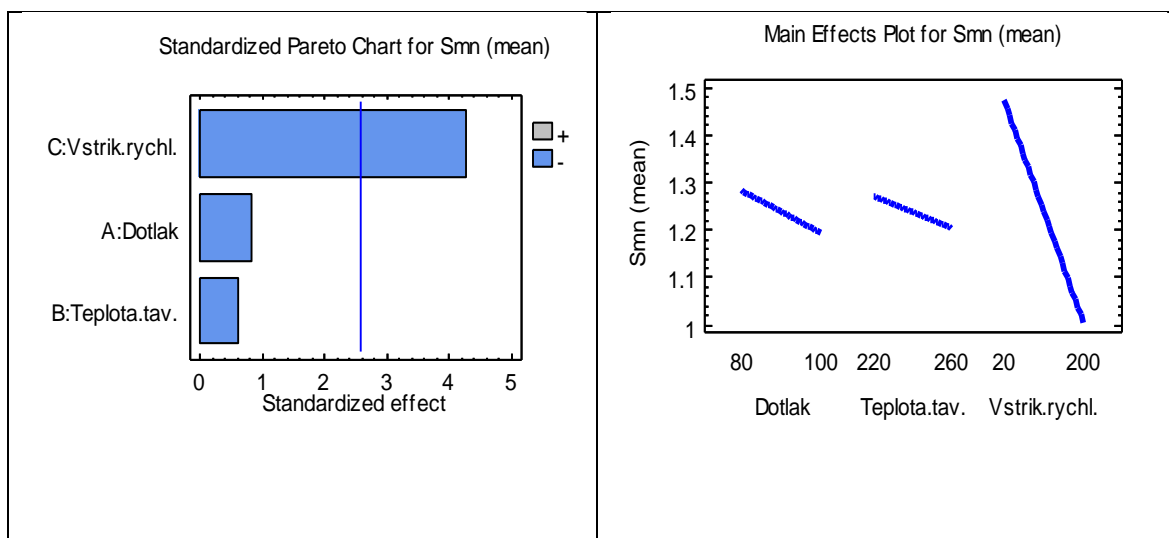
5.2.3.2 Vliv technologických parametrů na lineární smrštění v příčném směru S_{Mn}

Výsledky vlivu technologických parametrů na smrštění v příčném směru jsou uvedeny v tab. 16:

Tab. 16: Výsledky analýzy rozptylu dat a modelu experimentu

Analysis of Variance for S_{Mn} (mean)					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
A:Dotlak	0.0119707	1	0.0119707	0.67	0.4510
B:Teplota.tav.	0.0067335	1	0.0067335	0.38	0.5668
C:Vstrik.rychl.	0.326637	1	0.326637	18.22	0.0079
Total error	0.0896327	5	0.0179265		
Total (corr.)	0.434974	8			

Vliv uvažovaných parametrů je dále posouzen pomocí grafů:



Obr. 89: Paretův graf vlivu parametrů (vlevo) a graf hlavních efektů parametrů (vpravo)

Paretův graf ukazuje vliv jednotlivých parametrů na hodnoty smrštění v příčném směru, kdy vlivnost parametru je úměrná délce úsečky a svislá modrá čára představuje hladinu významnosti pro $\alpha = 0.05$. Z grafu vyplývá:

- nejsilnější vliv je patrný u parametru vstřikovací rychlost (jako jediný přesáhl hladinu statistické významnosti, je tedy statisticky významný)
- výrazně slabší (a statisticky nevýznamný) vliv je patrný u dvojice parametrů dotlak a teplota taveniny
- všechny tři uvažované parametry snižují hodnoty sledované proměnné – S_{Mn} , tedy smrštění v příčném směru

Obdobné závěry jsou patrné z grafu hlavních efektů parametrů.

Z dílčích grafů (úseček) je zřejmé, že největší vliv má parametr vstřikovací rychlost, úsečka má výrazný sklon (směrnici) a vliv na sledovanou proměnnou, úsečky parametrů teplota taveniny a dotlak vykazují malý sklon, mají malý vliv na sledovanou proměnnou.

Optimální nastavení všech tří parametrů pro dosažení požadovaného výsledku – minimální hodnoty smrštění v příčném směru, je uvedeno v tab.17. Doporučené hodnoty byly stanoveny s ohledem na minimální průměrnou hodnotu smrštění v příčném směru.

Tab. 17: Optimální nastavení parametrů

Optimize Response

Goal: minimize S_{Mn} (mean)

Optimum value = 0.927643

<i>Factor</i>	<i>Low</i>	<i>High</i>	Optimum
A: Dotlak	80.0	100.0	100.0
B: Teplota taveniny	220.0	260.0	260.0
C: Vstřikovací rychlost	20.0	200.0	200.0

Z tab. 17 je zřejmé, že:

- minimální hodnoty smrštění v podélném směru výlisek dosáhne při maximálních hodnotách dotlaku (100 %), maximální teplotě taveniny (260 °C) a maximální vstřikovací rychlosti (200 ccm.s⁻¹). Při takovém nastavení faktorů bude hodnota smrštění v podélném směru dosahovat průměrné hodnoty 0.9276.

V tab. 18 jsou k dispozici vypočtené hodnoty regresních koeficientů a výsledná rovnice, popisující závislost smrštění v příčném směru na dotlaku, teplotě taveniny a vstřikovací rychlosti.

Tab. 18. Regresní koeficienty výsledného modelu

Regression coeffs. for S_{Mn} (mean)	
<i>Coefficient</i>	<i>Estimate</i>
constant	2.32552
A:Dotlak	-0.00446667
B:Teplota taveniny	-0.001675
C:Vstřikovací rychlost	-0.00258716

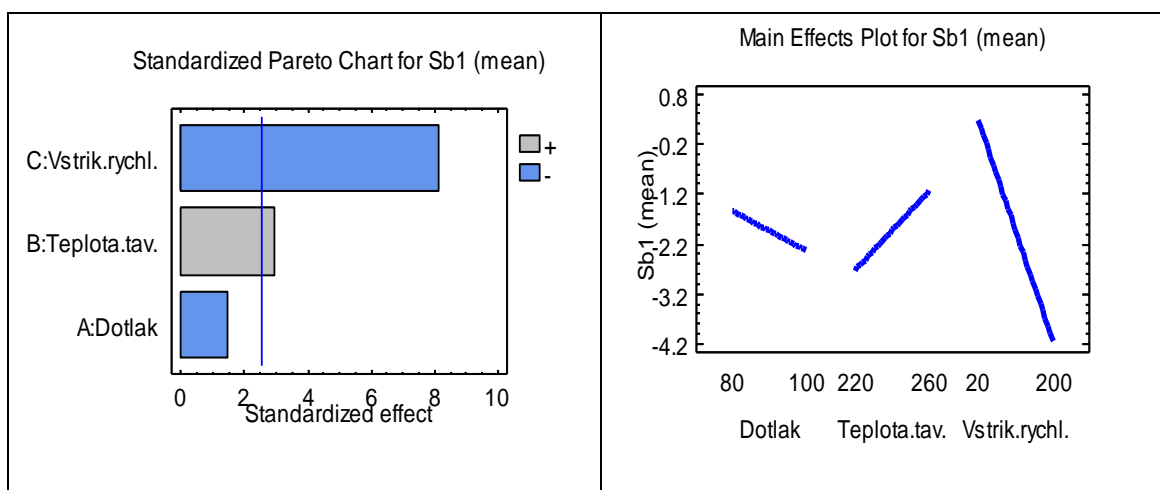
5.2.3.3 Vliv technologických parametrů na smrštění S_{b1}

Výsledky vlivu technologických parametrů na smrštění S_{b1} jsou uvedeny v tab. 19:

Tab. 19: Výsledky analýzy rozptylu dat a modelu experimentu

Analysis of Variance for S_{b1} (mean)					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
A:Dotlak	0.940896	1	0.940896	2.14	0.2038
B:Teplota.tav.	3.76358	1	3.76358	8.54	0.0329
C:Vstrik.rychl.	28.9531	1	28.9531	65.71	0.0005
Total error	2.20316	5	0.440633		
Total (corr.)	35.8608	8			

Vliv uvažovaných parametrů je dále posouzen pomocí grafů:



Obr. 90: Paretův graf vlivu parametrů (vlevo) a graf hlavních efektů parametrů (vpravo)

Z Paretova grafu je zřejmé:

- nejsilnější (a statisticky významný) vliv je patrný u parametru vstřikovací rychlost
- výrazně slabší (ale rovněž statisticky významný) je patrný vliv u parametru teplota taveniny, parametr dotlak je nejslabší a statisticky nevýznamný
- parametry vstřikovací rychlost a dotlak snižují hodnoty sledované proměnné S_{b1} , teplota taveniny naopak tyto hodnoty zvyšuje

Obdobné závěry jsou patrné z grafu hlavních efektů parametrů. Optimální nastavení všech tří parametrů pro dosažení požadovaného výsledku – nulové hodnoty smrštění S_{b1} , je uvedeno v tab. 20. Doporučené hodnoty byly stanoveny s ohledem na nulovou průměrnou hodnotu smrštění S_{b1} .

Tab. 20: Optimální nastavení parametrů

Optimize Response			
Goal: maintain S_{b1} at 0.0 (mean)			
Optimum value = 0.0			
Factor	Low	High	Optimum
A: Dotlak	80.0	100.0	91.3702
B: Teplota taveniny	220.0	260.0	248.318
C: Vstřikovací rychlost	20.0	200.0	41.1892

Z tab. 20 je zřejmé, že:

- nulové hodnoty smrštění S_{b1} výlisek dosáhne při hodnotách dotlaku 91,37 %, teplotě taveniny 248,3 °C a vstřikovací rychlosti 41,2 ccm.s⁻¹. Při takovém nastavení faktorů bude hodnota smrštění S_{b1} dosahovat průměrné hodnoty 0.

V tab. 21 jsou k dispozici vypočtené hodnoty regresních koeficientů a výsledná rovnice, popisující závislost smrštění S_{b1} na dotlaku, teplotě taveniny a vstřikovací rychlosti.

Tab. 21: Regresní koeficienty výsledného modelu

Regression coeffs. for S_{b1} (mean)	
Coefficient	Estimate
constant	-5.21184
A:Dotlak	-0.0396
B:Teplota taveniny	0.0396
C:Vstřikovací rychlost	-0.0243578

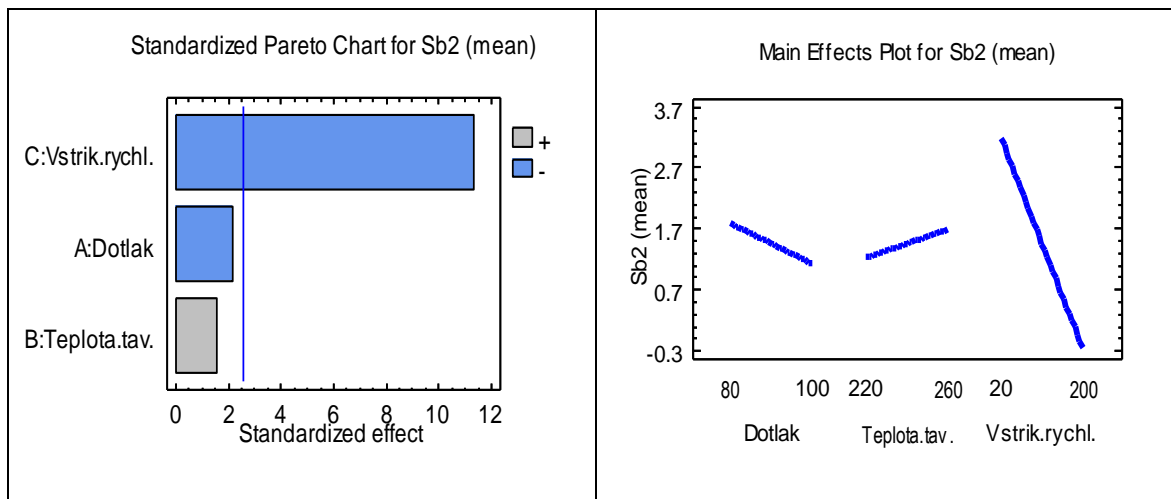
5.2.3.4 Vliv technologických parametrů na smrštění S_{b2}

Výsledky vlivu technologických parametrů na smrštění S_{b2} . Výsledky jsou uvedeny v tab. 22.

Tab. 22. Výsledky analýzy rozptylu dat a modelu experimentu

Analysis of Variance for S_{b2} (mean)					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
A:Dotlak	0.6534	1	0.6534	4.73	0.0816
B:Teplo.ta.tav.	0.320166	1	0.320166	2.32	0.1883
C:Vstrik.rychl.	17.7966	1	17.7966	128.91	0.0001
Total error	0.690247	5	0.138049		
Total (corr.)	19.4604	8			

Vliv uvažovaných parametrů je dále posouzen pomocí grafů:



Obr. 91: Paretův graf vlivu parametrů (vlevo) a graf hlavních efektů parametrů (vpravo)

Z Paretova grafu je zřejmé:

- nejsilnější (a statisticky významný) vliv je patrný u parametru vstřikovací rychlost

- výrazně slabší (těsně u hranice významnosti) je patrný vliv u parametru dotlak, parametr teplota taveniny je nejslabší a statisticky nevýznamný
 - parametry vstřikovací rychlost a dotlak snižují hodnoty sledované proměnné S_{b2} , parametr teplota taveniny naopak tyto hodnoty zvyšuje (velice slabě)
- Obdobné závěry jsou patrné z grafu hlavních efektů parametrů.

Optimální nastavení všech tří parametrů pro dosažení požadovaného výsledku – nulové hodnoty smrštění S_{b2} , je uvedeno v tab. 23. Doporučené hodnoty byly stanoveny s ohledem na nulovou průměrnou hodnotu smrštění S_{b2} .

Tab. 23: Optimální nastavení parametrů

Optimize Response			
Goal: maintain S_{b2} at 0.0 (mean)			
Optimum value = 0.0			
<i>Factor</i>	<i>Low</i>	<i>High</i>	Optimum
A: Dotlak	80.0	100.0	90.7483
B: Teplota taveniny	220.0	260.0	230.033
C: Vstřikovací rychlost	20.0	200.0	178.26

Z tab. 23 je zřejmé, že:

- nulové hodnoty smrštění S_{b2} výlisek dosáhne při hodnotách dotlaku 90,75 %, teplotě taveniny (230 °C) a vstřikovací rychlosti 178,3 ccm.s⁻¹. Při takovém nastavení faktorů bude hodnota smrštění S_{b2} dosahovat průměrné hodnoty 0.

V tab. 24 jsou k dispozici vypočtené hodnoty regresních koeficientů a výsledná rovnice, popisující závislost smrštění S_{b2} na dotlaku, teplotě taveniny a vstřikovací rychlosti.

Tab. 24: Regresní koeficienty výsledného modelu

Regression coeffs. for S_{b2} (mean)	
Coefficient	Estimate
constant	6.2022
A:Dotlak	-0.0506
B:Teplota taveniny	0.0132
C:Vstřikovací rychlost	-0.0188893

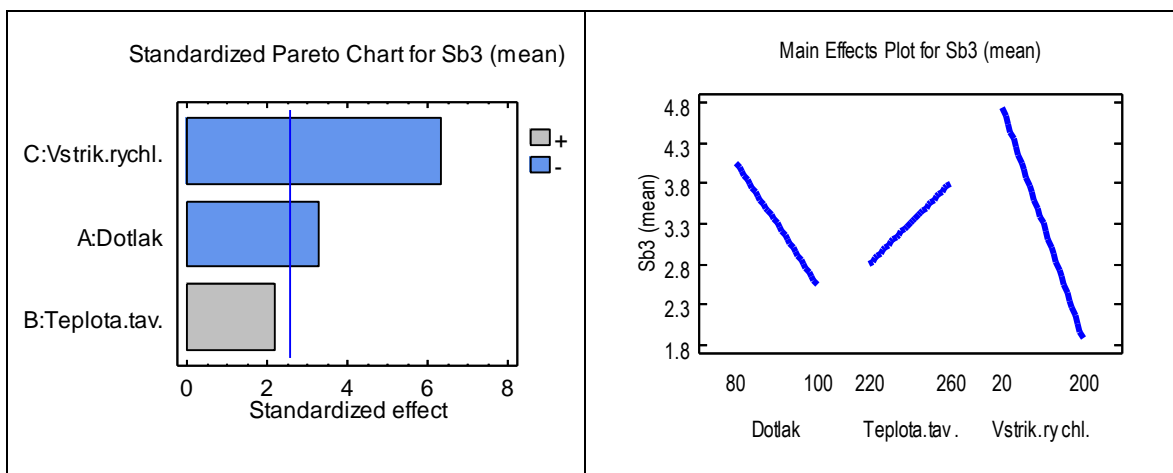
5.2.3.5 Vliv technologických parametrů na smrštění S_{b3}

Výsledky vlivu technologických parametrů na smrštění S_{b3} . Výsledky jsou uvedeny v tab. 25.

Tab. 25. Výsledky analýzy rozptylu dat a modelu experimentu

Analysis of Variance for S_{b3} (mean)					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
A:Dotlak	3.30784	1	3.30784	10.85	0.0216
B:Teplota.tav.	1.47015	1	1.47015	4.82	0.0795
C:Vstrik.rychl.	12.1774	1	12.1774	39.93	0.0015
Total error	1.52497	5	0.304993		
Total (corr.)	18.4803	8			

Vliv uvažovaných faktorů je dále posouzen pomocí grafů:



Obr. 92: Paretův graf vlivu parametrů (vlevo) a graf hlavních efektů parametrů (vpravo)

Z Paretova grafu je zřejmé:

- nejsilnější (a statisticky významný) vliv je patrný u parametru vstřikovací rychlost
- výrazně slabší (ale rovněž statisticky významný) je patrný vliv u parametru dotlak, parametr teplota taveniny je nejslabší, na hranici statistické významnosti
- parametry vstřikovací rychlost a dotlak snižují hodnoty sledované proměnné – S_{b3} , teplota taveniny naopak zvyšuje (slabě) hodnoty S_{b3}

Obdobné závěry jsou patrné z grafu hlavních efektů faktorů.

Optimální nastavení všech tří parametrů pro dosažení požadovaného výsledku – minimální hodnoty smrštění S_{b3} , je uvedeno v tab. 26.

Tab. 26: Optimální nastavení parametrů

Optimize Response			
Goal: minimize S_{b3} (mean)			
Optimum value = 0.632139			
Factor	Low	High	Optimum
A: Dotlak	80.0	100.0	100.0
B: Teplota taveniny	220.0	260.0	220.0
C: Vstřikovací rychlost	20.0	200.0	200.0

Z tab. 26 je zřejmé, že:

- minimální hodnoty smrštění S_{b3} výlisek dosáhne při maximálních hodnotách dotlaku (100 %), minimální teplotě taveniny (220 °C) a maximální vstřikovací rychlosti (200 ccm.s⁻¹). Při takovém nastavení parametrů bude hodnota smrštění v pozici S_{b3} dosahovat průměrné hodnoty 0.63.

V tab. 27 jsou k dispozici vypočtené hodnoty regresních koeficientů a výsledná rovnice, popisující závislost smrštění S_{b3} na dotlaku, teplotě taveniny a vstřikovací rychlosti.

Tab. 27: Regresní koeficienty výsledného modelu

Regression coeffs. for S_{b3} (mean)	
Coefficient	Estimate
constant	5.77148
A:Dotlak	-0.07425
B:Teplota taveniny	0.02475
C:Vstřikovací rychlost	-0.0157967

5.3 Výsledky a vyhodnocení lokálního, podélného a příčného výrobního smrštění výstřiků pro materiál PP Scolefin 54 T 10-0

V následující tabulce a grafech jsou popsány naměřené hodnoty lokálního, podélného a příčného smrštění zkušebních těles vyrobených z materiálu PP Scolefin 54 T 10-0 (homopolymer polypropylenu + 40 % talku)

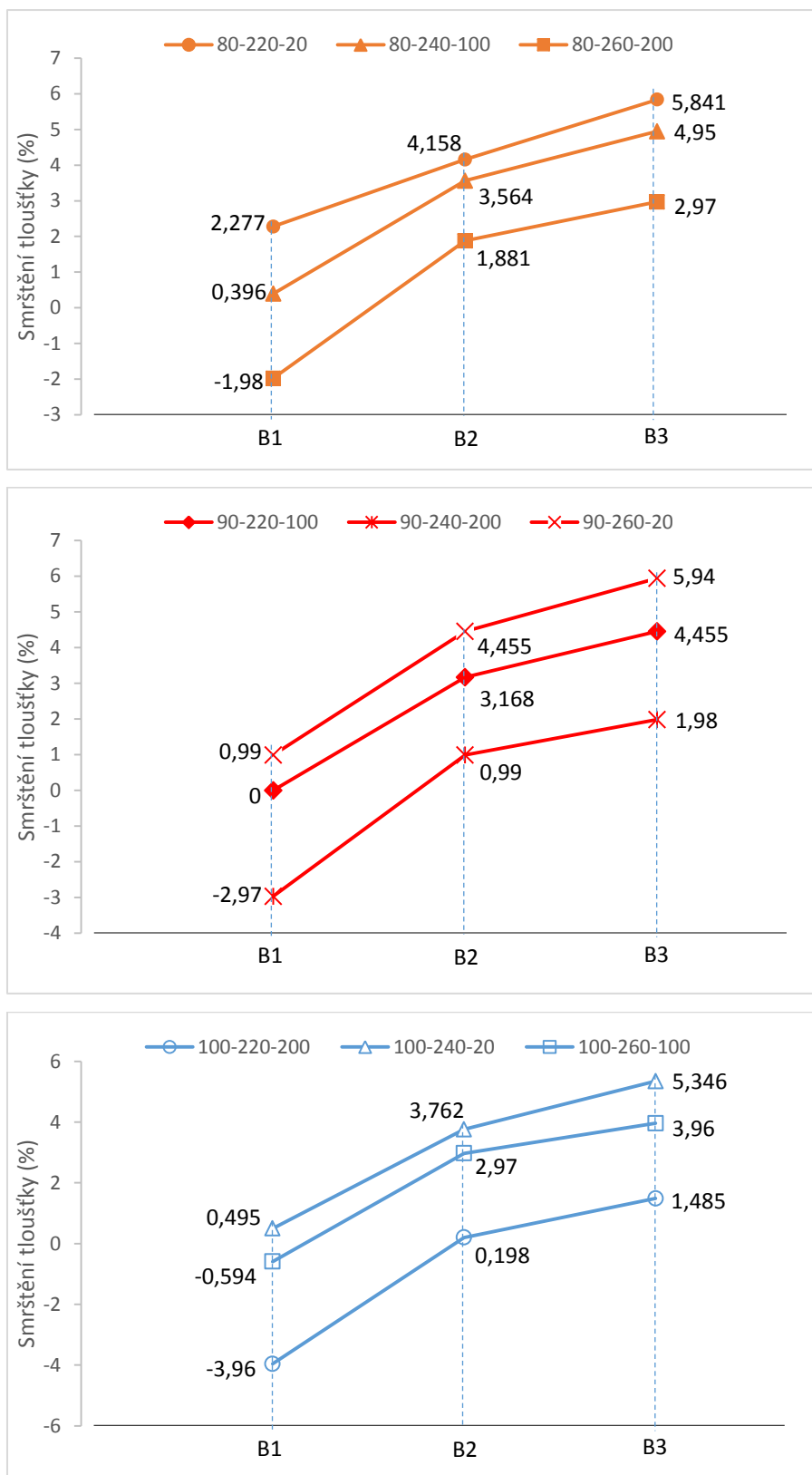
Tab. 28: Lokální, příčné a podélné výrobní smrštění- materiál PP Scolefin 54 T 10-0

Lokální výrobní smrštění (%)

Materiál	PP Scolefin 54 T 10-0					
Parametry	S_{b1}	σ	S_{b2}	σ	S_{b3}	σ
80-220- 20	2,277	0,061	4,158	0,081	5,841	0,079
80-240-100	0,396	0,024	3,564	0,047	4,950	0,053
80-260-200	-1,980	0,065	1,881	0,048	2,970	0,040
90-220-100	0	0,055	3,168	0,051	4,455	0,055
90-240-200	-2,970	0,072	0,990	0,038	1,980	0,082
90-260- 20	0,990	0,060	4,455	0,025	5,940	0,019
100-220-200	-3,960	0,108	0,198	0,079	1,485	0,053
100-240- 20	0,495	0,078	3,762	0,042	5,346	0,073
100-260-100	-0,594	0,059	2,970	0,054	3,960	0,028

Příčné a podélné výrobní smrštění (%)

Materiál	PP Scolefin 54 T 10-0			
Parametry	S_{Mp}	σ	S_{Mn}	σ
80-220- 20	1,122	0,069	1,232	0,019
80-240-100	0,871	0,055	1,094	0,045
80-260-200	0,713	0,029	0,821	0,076
90-220-100	0,789	0,072	0,965	0,043
90-240-200	0,710	0,056	0,739	0,084
90-260- 20	1,042	0,028	1,185	0,078
100-220-200	0,652	0,081	0,652	0,027
100-240- 20	0,993	0,067	1,082	0,073
100-260-100	0,836	0,055	0,950	0,056



Obr. 93: Graf lokálního výrobního smrštění tloušťky pro jednotlivé kombinace parametrů - PP Scolefin 54 T 10-0

5.3.1 Výsledky lokálního smrštění

Naměřené lokální smrštění v jednotlivých kontrolovaných pozicích v různé vzdálenosti od vtokového ústí mělo směrem k nejvzdálenějšímu místu od vtoku rostoucí charakter u všech kombinací nastavovaných technologických parametrů. Negativní smrštění Sb_1 (zvětšení rozměru) bylo naměřeno u vtokového ústí pro všechny kombinace technologických parametrů s nastavenou vstřikovací rychlostí 200 ccm.s^{-1} a jeho hodnota se zvětšovala přibližně o jedno procento s rostoucí hladinou dotlaku; 80-260-200 (-1,980%); 90-240-200 (-2,970%); 100-220-200 (-3,960%). Negativní hodnota smrštění Sb_1 byla zjištěna i pro parametrickou kombinaci 100-260-100 (-0,594%).

Nejvyšší naměřená hodnota lokálního smrštění tloušťky Sb_1 (2,277%) byla zjištěna při parametrech 80-220-20, Sb_2 (4,455%) a Sb_3 (5,940%) při parametrech 90-260-20. Nejnižší nezáporná hodnota lokálního smrštění tloušťky Sb_1 (0%) byla naměřena při parametrech 90-220-100, Sb_2 (0,198%) a Sb_3 (1,485%) při parametrech 100-220-200.

5.3.2 Výsledky podélného a příčného smrštění

Pro všechny kombinace nastavovaných technologických nebyla prokázána významná anizotropie. Nejvyšší hodnota podélného i příčného smrštění byla naměřena pro kombinace parametrů 80-220-20 ($S_{Mp} = 1,122\%$; $S_{Mn} = 1,232\%$). Nejmenší naměřené výrobní smrštění jak v podélném, tak v příčném směru ($S_{Mp} = 0,652\%$; $S_{Mn} = 0,652\%$) lze charakterizovat jako izotropní a bylo zjištěno při nastavených parametrech 100-220-200.

5.3.3 Vyhodnocení naměřených výsledků statistickou analýzou plánovaného experimentu typu DOE pro materiál PP Scolefin 54 T 10-0

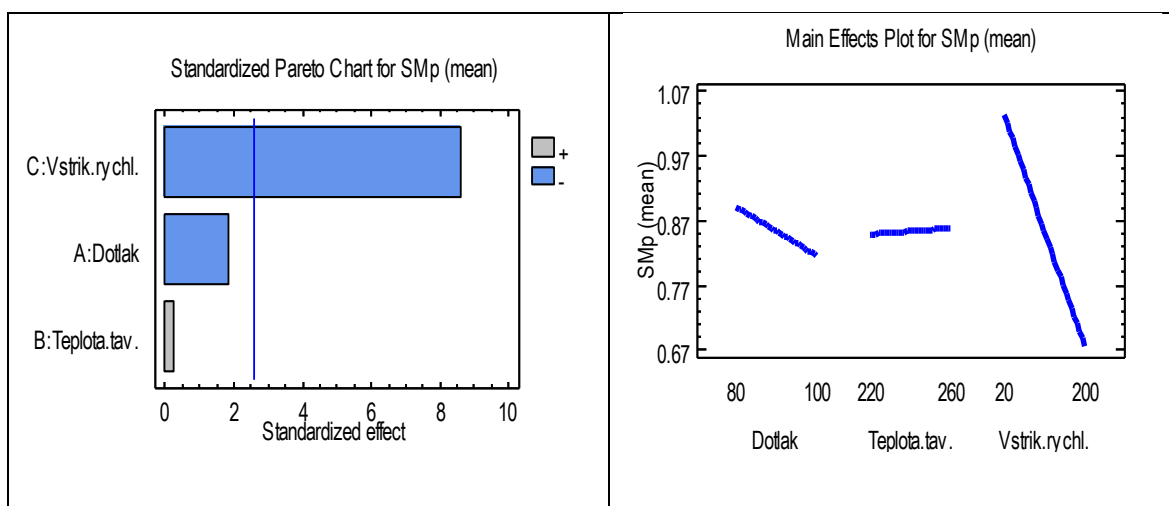
5.3.3.1 Vliv technologických parametrů na lineární smrštění v podélném směru S_{Mp}

V prvním kroku byl vyhodnocen vliv dotlaku, teploty taveniny a vstřikovací rychlosti na smrštění v podélném směru u materiálu PP Scolefin 54 T 10-0. Výsledky jsou uvedeny v tab. 29.

Tab. 29: Výsledky analýzy rozptylu dat a modelu experimentu

Analysis of Variance for S_{Mp} (mean)					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
A:Dotlak	0.0084375	1	0.0084375	3.28	0.1297
B:Teplota.tav.	0.000130667	1	0.000130667	0.05	0.8305
C:Vstrik.rychl.	0.191141	1	0.191141	74.42	0.0003
Total error	0.0128425	5	0.0025685		
Total (corr.)	0.212552	8			

Vliv uvažovaných parametrů je dále posouzen pomocí grafů:



Obr. 94: Paretův graf vlivu parametrů (vlevo) a graf hlavních efektů parametrů (vpravo)

Paretův graf ukazuje vliv jednotlivých parametrů na hodnoty smrštění v podélném směru, kdy vlivnost parametru je úměrná délce úsečky a svislá modrá čára představuje hladinu významnosti pro $\alpha = 0.05$. Z grafu vyplývá:

- nejsilnější vliv (nejdelší úsečka) je patrný u parametru vstřikovací rychlost
- výrazně slabší (a statisticky nevýznamný) vliv je patrný u dvojice parametrů teplota taveniny a dotlak
- parametry vstřikovací rychlost a dotlak snižují (modrá barva) hodnoty sledované proměnné – S_{Mp} , teplota taveniny naopak zvyšuje hodnoty S_{Mp}

Obdobné závěry jsou patrné z grafu hlavních efektů faktorů:

- z dílčích grafů (úseček) je zřejmé, že největší vliv má parametr vstřikovací rychlost, úsečka má větší sklon (směrnici) a vliv na sledovanou proměnnou
- úsečky parametrů teplota taveniny a dotlak vykazují malý sklon, mají malý vliv na sledovanou proměnnou

Optimální nastavení všech tří parametrů pro dosažení požadovaného výsledku – minimální hodnoty smrštění v podélném směru, je uvedeno v tab. 30. Doporučené hodnoty byly stanoveny s ohledem na minimální průměrnou hodnotu smrštění v podélném směru.

Tab. 30. Optimální nastavení parametrů

Optimize Response			
Goal: minimize S_{Mp} (mean)			
Optimum value = 0.631784			
<i>Factor</i>	<i>Low</i>	<i>High</i>	Optimum
A: Dotlak	80.0	100.0	100.0
B: Teplota taveniny	220.0	260.0	220.0
C: Vstřikovací rychlost	20.0	200.0	200.0

Z tab. 30 je zřejmé, že:

- minimální hodnoty smrštění v podélném směru výlisek dosáhne při maximálních hodnotách dotlaku (100 %), minimální teplotě taveniny

(220 °C) a maximální vstřikovací rychlosti (200 ccm.s⁻¹). Při takovém nastavení parametrů bude hodnota smršťení v podélném směru dosahovat průměrné hodnoty 0.63.

V tab. 31 jsou k dispozici vypočtené hodnoty regresních koeficientů a výsledná rovnice, popisující závislost smršťení v podélném směru na dotlaku, teplotě taveniny a vstřikovací rychlosti.

Tab. 31: Regresní koeficienty výsledného modelu

Regression coeffs. for S_{Mp} (mean)	
<i>Coefficient</i>	<i>Estimate</i>
constant	1.35127
A:Dotlak	-0.00375
B:Teplota taveniny	0.000233333
C:Vstřikovací rychlost	-0.0019791

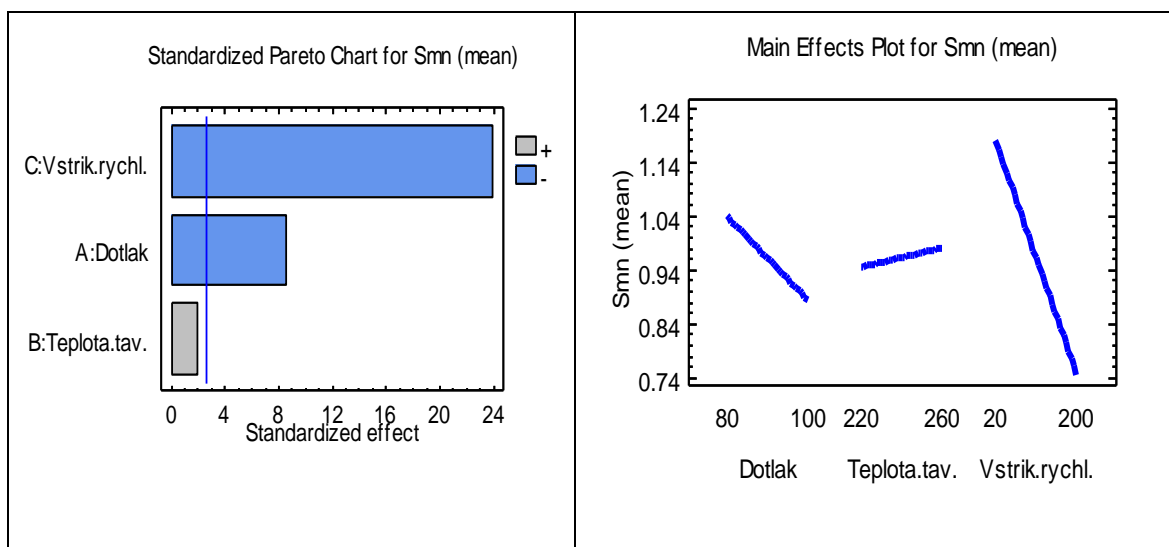
5.3.3.2 Vliv technologických parametrů na smršťení v příčném směru S_{Mn}

V dalším kroku byl vyhodnocen vliv dotlaku, teploty taveniny a vstřikovací rychlosti na smršťení v příčném směru. Výsledky jsou uvedeny v tab. 32:

Tab. 32: Výsledky analýzy rozptylu dat a modelu experimentu

Analysis of Variance for S_{Mn} (mean)					
<i>Source</i>	<i>Sum of Squares</i>	<i>Df</i>	<i>Mean Square</i>	<i>F-Ratio</i>	<i>P-Value</i>
A:Dotlak	0.0357282	1	0.0357282	73.12	0.0004
B:Teplota.tav.	0.00190817	1	0.00190817	3.91	0.1051
C:Vstrik.rychl.	0.279809	1	0.279809	572.65	0.0000
Total error	0.0024431	5	0.00048862		
Total (corr.)	0.319889	8			

Vliv uvažovaných parametrů je dále posouzen pomocí grafů:



Obr. 95: Paretův graf vlivu parametrů (vlevo) a graf hlavních efektů parametrů (vpravo)

Paretův graf ukazuje vliv jednotlivých parametrů na hodnoty smrštění v příčném směru, z grafu vyplývá:

- nejsilnější vliv je patrný u parametru vstřikovací rychlost
- výrazně slabší (ale rovněž statisticky významný) vliv je patrný u parametru dotlak, faktor teplota taveniny je nejslabší a statisticky nevýznamný
- parametry vstřikovací rychlost a dotlak snižují hodnoty sledované proměnné – S_{Mn} , tedy smrštění v příčném směru, teplota taveniny naopak zvyšuje (velice slabě) hodnoty S_{Mn}

Obdobné závěry jsou patrné z grafu hlavních efektů parametrů.

Optimální nastavení všech tří parametrů pro dosažení požadovaného výsledku – minimální hodnoty smrštění v příčném směru, je uvedeno v tab. 33. Doporučené hodnoty byly stanoveny s ohledem na minimální průměrnou hodnotu smrštění v příčném směru.

Tab. 33: Optimální nastavení parametrů

Optimize Response			
Goal: minimize S_{Mn} (mean)			
Optimum value = 0.650399			
Factor	Low	High	Optimum
A: Dotlak	80.0	100.0	100.0
B: Teplota taveniny	220.0	260.0	220.0
C: Vstřikovací rychlost	20.0	200.0	200.0

Z tab. 33 je zřejmé, že:

- minimální hodnoty smrštění v podélném směru výlisek dosáhne při maximálních hodnotách dotlaku (100 %), minimální teplotě taveniny (220 °C) a maximální vstřikovací rychlosti (200 ccm.s⁻¹). Při takovém nastavení parametrů bude hodnota smrštění v podélném směru dosahovat průměrné hodnoty 0.65.

V tab. 34 jsou k dispozici vypočtené hodnoty regresních koeficientů a výsledná rovnice, popisující závislost smrštění v příčném směru na dotlaku, teplotě taveniny a vstřikovací rychlosti.

Tab. 34: Regresní koeficienty výsledného modelu

Regression coeffs. for S_{Mn} (mean)	
Coefficient	Estimate
constant	1.70481
A:Dotlak	-0.00771667
B:Teplota taveniny	0.000891667
C:Vstřikovací rychlost	-0.00239454

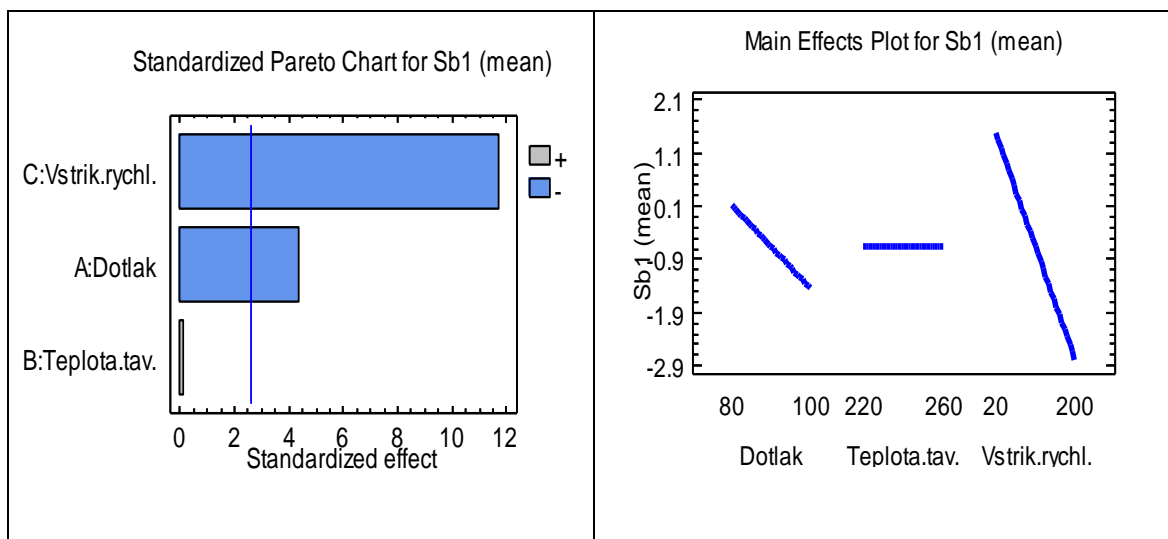
5.3.3.3 Vliv technologických proměnných na smrštění S_{b1}

Vyhodnocení vlivu vstřikovacích parametrů na smrštění S_{b1} . Výsledky jsou uvedeny v tab. 35.

Tab. 35. Výsledky analýzy rozptylu dat a modelu experimentu

Analysis of Variance for S_{b1} (mean)					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
A:Dotlak	3.76358	1	3.76358	18.77	0.0075
B:Teplota.tav.	0.0016335	1	0.0016335	0.01	0.9316
C:Vstrik.rychl.	27.3991	1	27.3991	136.64	0.0001
Total error	1.00257	5	0.200513		
Total (corr.)	32.1669	8			

Vliv uvažovaných parametrů je dále posouzen pomocí grafů:



Obr. 96: Paretův graf vlivu parametrů (vlevo) a graf hlavních efektů parametrů (vpravo)

Z Paretova grafu je zřejmé:

- nejsilnější (a statisticky významný) vliv je patrný u parametru vstřikovací rychlost

- výrazně slabší (ale rovněž statisticky významný) je patrný vliv u parametru dotlak, teplota taveniny je nejslabší a statisticky nevýznamný
- parametry vstřikovací rychlost a dotlak snižují hodnoty sledované proměnné – S_{b1} , teplota taveniny naopak zvyšuje hodnoty smrštění S_{b1}

Obdobné závěry jsou patrné z grafu hlavních efektů faktorů.

Optimální nastavení všech tří parametrů pro dosažení požadovaného výsledku – nulové hodnoty smrštění S_{b1} , je uvedeno v tab. 36.

Tab. 36: Optimální nastavení parametrů

Optimize Response			
Goal: maintain S_{b1} at 0.0 (mean)			
Optimum value = 0.0			
<i>Factor</i>	<i>Low</i>	<i>High</i>	Optimum
A: Dotlak	80.0	100.0	90.6964
B: Teplota taveniny	220.0	260.0	243.897
C: Vstřikovací rychlost	20.0	200.0	79.406

Z tab. 36 je zřejmé, že:

- nulové hodnoty smrštění S_{b1} výlisek dosáhne při hodnotách dotlaku 90.7 %, teplotě taveniny 243.9 °C a vstřikovací rychlosti 79.4 ccm.s⁻¹. Při takovém nastavení parametrů bude hodnota smrštění S_{b1} dosahovat průměrné hodnoty 0.

V tab. 37 jsou k dispozici vypočtené hodnoty regresních koeficientů a výsledná rovnice, popisující závislost smrštění S_{b1} na dotlaku, teplotě taveniny a vstřikovací rychlosti.

Tab. 37: Regresní koeficienty výsledného modelu

Regression coeffs. for S_{b1} (mean)	
Coefficient	Estimate
constant	8.86348
A:Dotlak	-0.0792
B:Teplota taveniny	0.000825
C:Vstrikovací rychlost	-0.0236951

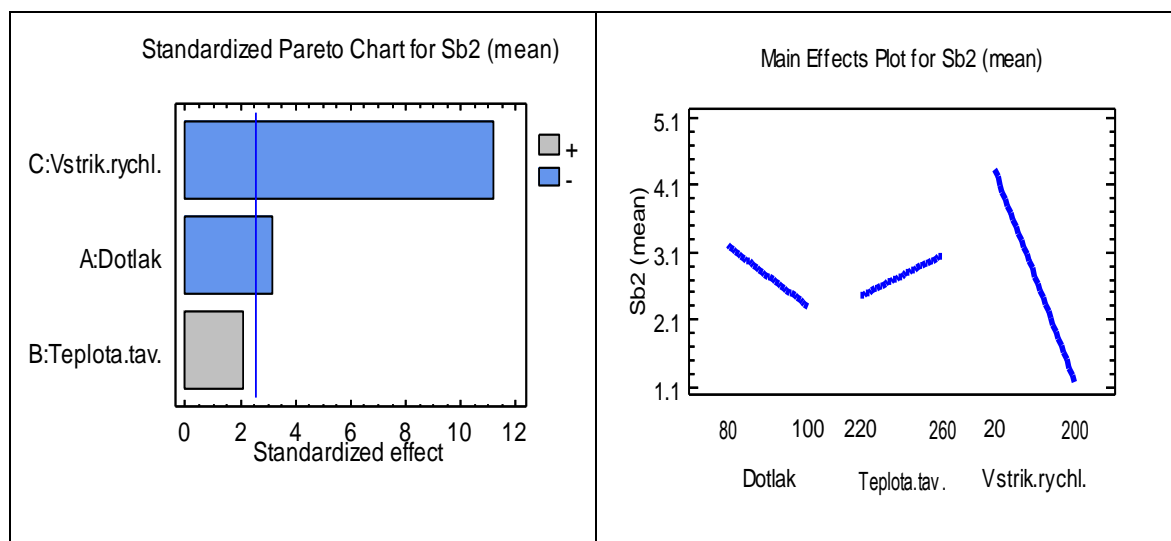
5.3.3.4 Vliv technologických parametrů na smrštění S_{b2}

Vyhodnocení vlivu vstřikovacích parametrů na smrštění S_{b2} . Výsledky jsou uvedeny v tab. 38.

Tab. 38: Výsledky analýzy rozptylu dat a modelu experimentu

Analysis of Variance for S_{b2} (mean)					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
A:Dotlak	1.19082	1	1.19082	9.99	0.0251
B:Teplota.tav.	0.529254	1	0.529254	4.44	0.0890
C:Vstrik.rychl.	14.8311	1	14.8311	124.38	0.0001
Total error	0.596201	5	0.11924		
Total (corr.)	17.1474	8			

Vliv uvažovaných parametrů je dále posouzen pomocí grafů:



Obr. 97: Paretův graf vlivu parametrů (vlevo) a graf hlavních efektů parametrů (vpravo)

Z Paretova grafu je zřejmé:

- nejsilnější (a statisticky významný) vliv je patrný u parametru vstřikovací rychlost
- výrazně slabší (ale rovněž statisticky významný) je patrný vliv u parametru dotlak, parametr teplota taveniny je nejslabší a statisticky nevýznamný
- parametry vstřikovací rychlost a dotlak snižují hodnoty sledované proměnné – S_{b2} , teplota taveniny naopak zvyšuje (velice slabě) hodnoty S_{b2}

Obdobné závěry jsou patrné z grafu hlavních efektů faktorů.

Optimální nastavení všech tří parametrů pro dosažení požadovaného výsledku – minimální hodnoty smrštění S_{b2} je uvedeno v tab. 39.

Tab. 39: Optimální nastavení parametrů

Optimize Response			
Goal: minimize S_{b2} (mean)			
Optimum value = 0.424402			
Factor	Low	High	Optimum
A: Dotlak	80.0	100.0	100.0
B: Teplota taveniny	220.0	260.0	220.0
C: Vstřikovací rychlost	20.0	200.0	200.0

Z tab. 39 je zřejmé, že:

- minimální hodnoty smrštění S_{b2} výlisek dosáhne při maximálních hodnotách dotlaku (100 %), minimální teplotě taveniny (220 °C) a maximální vstřikovací rychlosti 200 ccm.s⁻¹. Při takovém nastavení faktorů bude hodnota smrštění dosahovat průměrné hodnoty 0.42.

V tab. 40 jsou k dispozici vypočtené hodnoty regresních koeficientů a výsledná rovnice, popisující závislost smrštění S_{b2} na dotlaku, teplotě taveniny a vstřikovací rychlosti.

Tab. 40: Regresní koeficienty výsledného modelu

Regression coeffs. for S_{b2} (mean)	
Coefficient	Estimate
constant	5.09904
A:Dotlak	-0.04455
B:Teplota taveniny	0.01485
C:Vstřikovací rychlost	-0.0174332

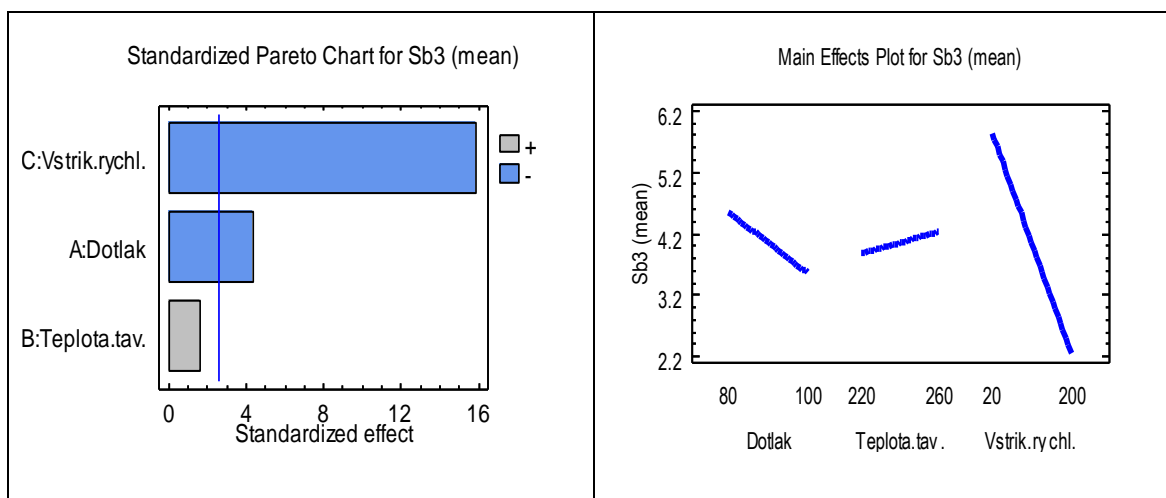
5.3.3.5 Vliv technologických parametrů na smrštění S_{b3}

Vyhodnocení vlivu vstřikovacích parametrů na smrštění S_{b3} . Výsledky jsou uvedeny v tab. 41.

Tab. 41: Výsledky analýzy rozptylu dat a modelu experimentu

Analysis of Variance for S_{b3} (mean)					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
A:Dotlak	1.47015	1	1.47015	19.09	0.0072
B:Teplota.tav.	0.197653	1	0.197653	2.57	0.1701
C:Vstrik.rychl.	19.3938	1	19.3938	251.76	0.0000
Total error	0.385158	5	0.0770316		
Total (corr.)	21.4468	8			

Vliv uvažovaných parametrů je dále posouzen pomocí grafů:



Obr. 98: Paretův graf vlivu parametrů (vlevo) a graf hlavních efektů parametrů (vpravo)

Z Paretova grafu je zřejmé:

- nejsilnější (a statisticky významný) vliv je patrný u parametru vstřikovací rychlost

- výrazně slabší (ale rovněž statisticky významný) je patrný vliv u parametru dotlak, parametr teplota taveniny je nejslabší, na hranici statistické významnosti
 - parametry vstřikovací rychlost a dotlak snižují hodnoty sledované proměnné – S_{b3} , teplota taveniny naopak zvyšuje (slabě) hodnoty S_{b3}
- Obdobné závěry jsou patrné z grafu hlavních efektů parametrů.

Optimální nastavení všech tří parametrů pro dosažení požadovaného výsledku – minimální hodnoty smrštění S_{b3} , je uvedeno v tab. 42.

Tab. 42: Optimální nastavení parametrů

Optimize Response			
Goal: minimize S_{b3} (mean)			
Optimum value = 1.56588			
Factor	Low	High	Optimum
A: Dotlak	80.0	100.0	100.0
B: Teplota taveniny	220.0	260.0	220.0
C: Vstřikovací rychlost	20.0	200.0	200.0

Z tab. 42 je zřejmé, že:

- minimální hodnoty smrštění S_{b3} výlisek dosáhne při maximálních hodnotách dotlaku (100 %), minimální teploty taveniny (220 °C) a maximální vstřikovací rychlosti (200 ccm.s⁻¹). Při takovém nastavení parametrů bude hodnota smrštění S_{b3} dosahovat průměrné hodnoty 1.56.

V tab. 43 jsou k dispozici vypočtené hodnoty regresních koeficientů a výsledná rovnice, popisující závislost smrštění S_{b3} na dotlaku, teplotě taveniny a vstřikovací rychlosti.

Tab. 43: Regresní koeficienty výsledného modelu

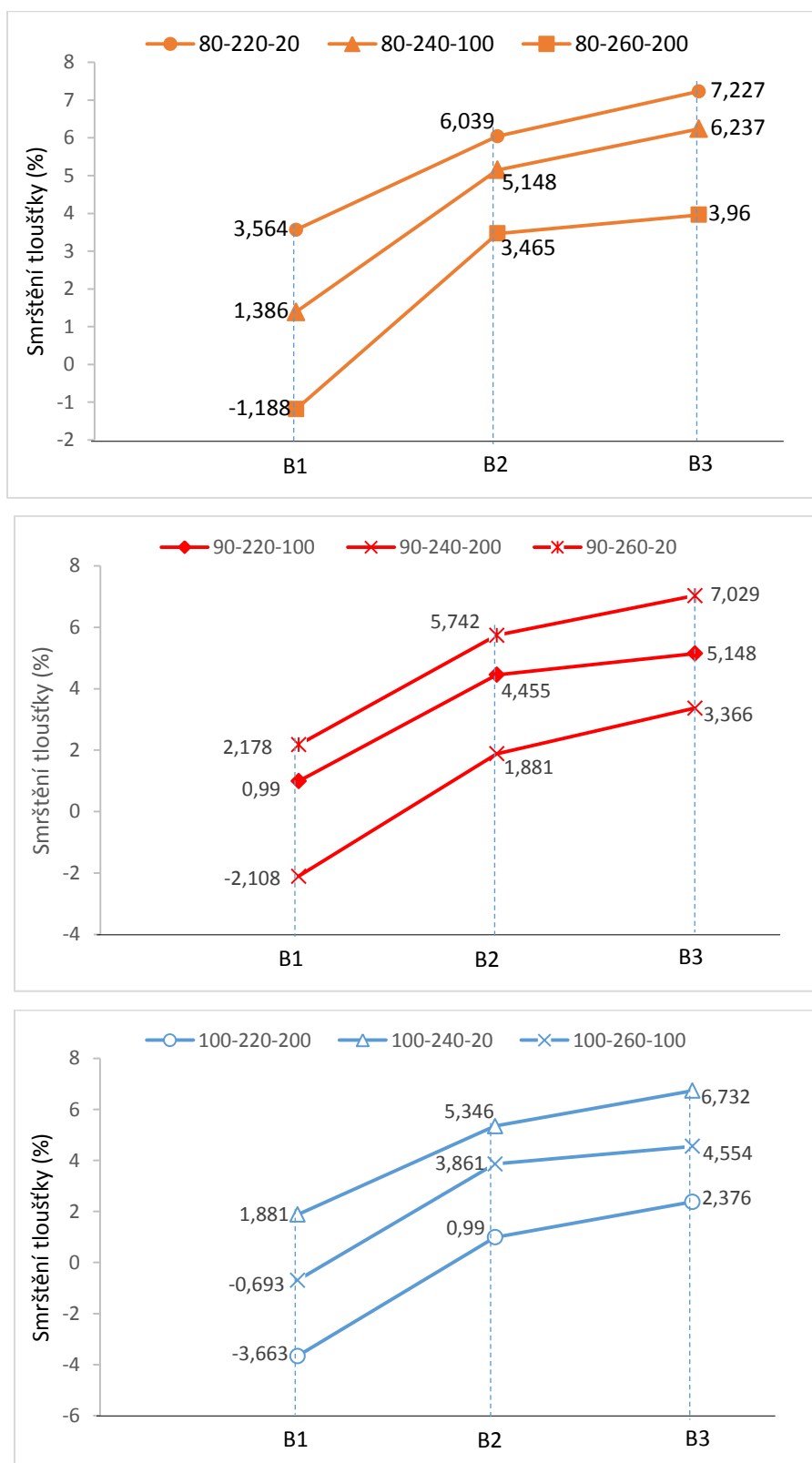
Regression coeffs. for S_{b3} (mean)	
<i>Coefficient</i>	<i>Estimate</i>
constant	8.50643
A:Dotlak	-0.0495
B:Teplota taveniny	0.009075
C:Vstřikovací rychlost	-0.0199352

5.4 Výsledky a vyhodnocení lokálního a lineárního výrobního smrštění výstřiků pro materiál PP Scolefin 34 G 10-0

V následující tabulce a grafech jsou popsány naměřené hodnoty lokálního, podélného a příčného smrštění zkušebních těles vyrobených z materiálu PP Scolefin 34 G 10-0 (homopolymer polypropylenu + 40% skleněných vláken).

Tab. 44: Lokální, příčné a podélné výrobní smrštění- materiál PP Scolefin 34 G 10-0

Lokální výrobní smrštění (%)						
Materiál	PP Scolefin 34 G 10-0					
Parametry	S_{b1}	σ	S_{b2}	σ	S_{b3}	σ
80-220- 20	3,564	0,065	6,039	0,047	7,227	0,032
80-240-100	1,386	0,099	5,148	0,069	6,237	0,055
80-260-200	-1,188	0,045	3,465	0,084	3,960	0,047
90-220-100	0,990	0,029	4,455	0,091	5,148	0,043
90-240-200	-2,108	0,074	1,881	0,076	3,366	0,080
90-260- 20	2,178	0,045	5,742	0,030	7,029	0,023
100-220-200	-3,663	0,123	0,990	0,079	2,376	0,066
100-240- 20	1,881	0,095	5,346	0,040	6,732	0,062
100-260-100	-0,693	0,132	3,861	0,071	4,554	0,029
Podélné a příčné výrobní smrštění (%)						
Materiál	PP Scolefin 34 G 10-0					
Parametry	S_{Mp}	σ	S_{Mn}	σ		
80-220- 20	0,321	0,065	1,031	0,026		
80-240-100	0,264	0,034	0,853	0,023		
80-260-200	0,243	0,012	0,631	0,019		
90-220-100	0,330	0,065	0,751	0,047		
90-240-200	0,263	0,076	0,633	0,053		
90-260- 20	0,258	0,056	1,019	0,045		
100-220-200	0,260	0,034	0,505	0,012		
100-240- 20	0,271	0,009	0,874	0,045		
100-260-100	0,189	0,058	0,656	0,089		



Obr. 99: Graf lokálního výrobního smrštění tloušťky pro jednotlivé kombinace parametrů - PP Scolefin 34 G 10-0

5.4.1 Výsledky lokálního smrštění

Naměřené lokální smrštění v jednotlivých kontrolovaných pozicích v různé vzdálenosti od vtokového ústí mělo směrem k nejvzdálenějšímu místu od vtoku rostoucí charakter u všech kombinací nastavovaných technologických parametrů. Negativní smrštění (zvětšení rozměru) Sb_1 bylo naměřeno u vtokového ústí pro všechny kombinace technologických parametrů s nastavenou vstřikovací rychlostí 200 ccm.s^{-1} a jeho hodnota se zvětšovala s rostoucí hladinou dotlaku; 80-260-200 (-1,188%); 90-240-200 (-2,108%); 100-220-200 (-3,663%). Negativní hodnota smrštění Sb_1 byla zjištěna i pro parametrickou kombinaci 100-260-100 (-0,693%).

Nejvyšší naměřená hodnota lokálního smrštění tloušťky Sb_1 (3,564%), Sb_2 (4,455%) a Sb_3 (5,940%) byla zjištěna při parametrech 80-220-20. Nejnižší nezáporná hodnota lokálního smrštění tloušťky Sb_1 (0,990%) byla naměřena při parametrech 90-220-100, Sb_2 (0,990%) a Sb_3 (2,376%) při parametrech 100-220-200.

5.4.2 Výsledky podélného a příčného smrštění

U všech kombinací nastavovaných vstřikovacích parametrů byla zjištěna anizotropie v rozmezí od 48,5% do 74,7%. Nejvyšší hodnotu anizotropie (74,7%) vykazovala parametrická kombinace 90-260-20, naopak nejnižší hodnota anizotropie byla naměřena pro parametry 100-220-200.

Nejvyšší hodnota podélného smrštění byla naměřena pro kombinaci parametrů 90-220-100 ($S_{Mp} = 0,330\%$), nejvyšší hodnota příčného smrštění ($S_{Mn} = 1,031\%$) pro kombinaci 80-220-20. Nejnižší výrobní smrštění v podélném směru ($S_{Mp} = 0,189\%$) bylo naměřeno pro parametry 100-260-100, nejnižší smrštění v příčném směru ($S_{Mn} = 0,505\%$) při nastavených parametrech 100-220-200.

5.4.3 Vyhodnocení naměřených výsledků statistickou analýzou plánovaného experimentu typu DOE pro materiál PP Scolefin 34 G 10-0

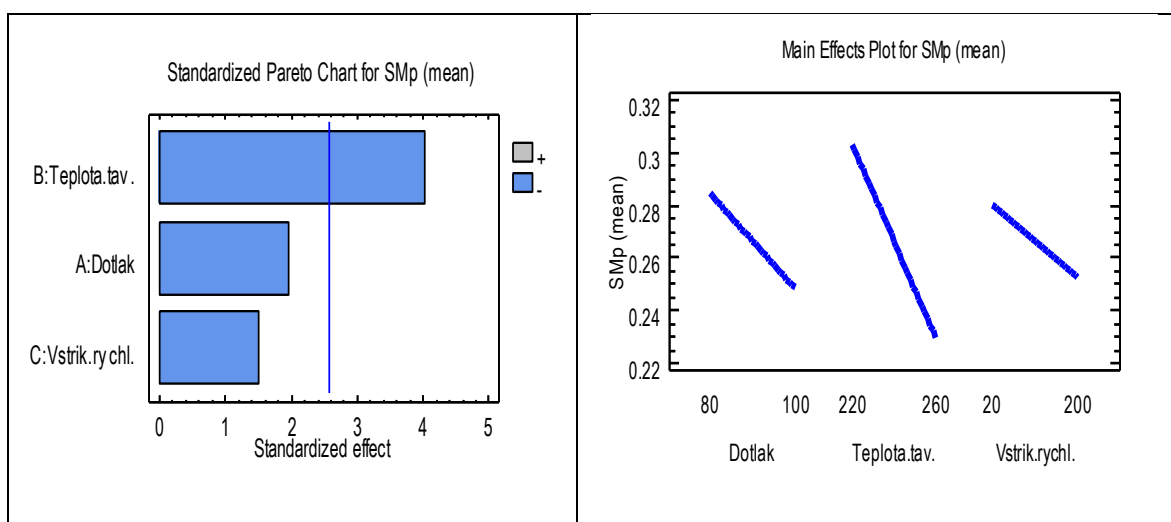
5.4.3.1 Vliv technologických parametrů na smrštění v podélném směru SMp

V prvním kroku byl vyhodnocen vliv dotlaku, teploty taveniny a vstřikovací rychlosti na smrštění v podélném směru u materiálu PP Scolefin 34 G 10-0. Výsledky jsou uvedeny v tab. 45:

Tab. 45: Výsledky analýzy rozptylu dat a modelu experimentu

Analysis of Variance for S_{Mp} (mean)					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
A:Dotlak	0.001944	1	0.001944	3.87	0.1062
B:Teplota.tav.	0.00814017	1	0.00814017	16.22	0.0101
C:Vstrik.rychl.	0.00112011	1	0.00112011	2.23	0.1955
Total error	0.00250995	5	0.000501989		
Total (corr.)	0.0137142	8			

Vliv uvažovaných parametrů je dále posouzen pomocí grafů:



Obr. 100: Paretův graf vlivu parametrů (vlevo) a graf hlavních efektů parametrů (vpravo)

Paretův graf ukazuje vliv jednotlivých parametrů na hodnoty smrštění v podélném směru, kdy vlivnost parametru je úměrná délce úsečky a svislá modrá čára představuje hladinu významnosti pro $\alpha = 0.05$. Z grafu vyplývá:

- nejsilnější vliv (nejdelší úsečka) je patrný u parametru teplota taveniny
- výrazně slabší (a statisticky nevýznamný) vliv je patrný u dvojice parametrů vstřikovací rychlost a dotlak
- všechny 3 parametry snižují (modrá barva) hodnoty sledované proměnné – S_{Mp}

Obdobné závěry jsou patrné z grafu hlavních efektů parametrů.

Optimální nastavení všech tří parametrů pro dosažení požadovaného výsledku – minimální hodnoty smrštění v podélném směru, je uvedeno v tab. 46. Doporučené hodnoty byly stanoveny s ohledem na minimální průměrnou hodnotu smrštění v podélném směru.

Tab. 46: Optimální nastavení faktorů

Optimize Response			
Goal: minimize S_{Mp} (mean)			
Optimum value = 0.197851			
<i>Factor</i>	<i>Low</i>	<i>High</i>	Optimum
A: Dotlak	80.0	100.0	100.0
B: Teplota taveniny	220.0	260.0	260.0
C: Vstřikovací rychlost	20.0	200.0	200.0

Z tab. 46 je zřejmé, že:

- minimální hodnoty smrštění v podélném směru výlisek dosáhne při maximálních hodnotách dotlaku (100 %), maximální teplotě taveniny (260 °C) a maximální vstřikovací rychlosti (200 ccm.s⁻¹). Při takovém nastavení faktorů bude hodnota smrštění v podélném směru dosahovat průměrné hodnoty 0.20.

V tab. 47 jsou k dispozici vypočtené hodnoty regresních koeficientů a výsledná rovnice, popisující závislost smrštění v podélném směru na dotlaku, teplotě taveniny a vstřikovací rychlosti.

Tab. 47: Regresní koeficienty výsledného modelu

Regression coeffs. for S_{Mp} (mean)	
<i>Coefficient</i>	<i>Estimate</i>
constant	0.886716
A:Dotlak	-0.0018
B:Teplota taveniny	-0.00184167
C:Vstřikovací rychlost	-0.000151503

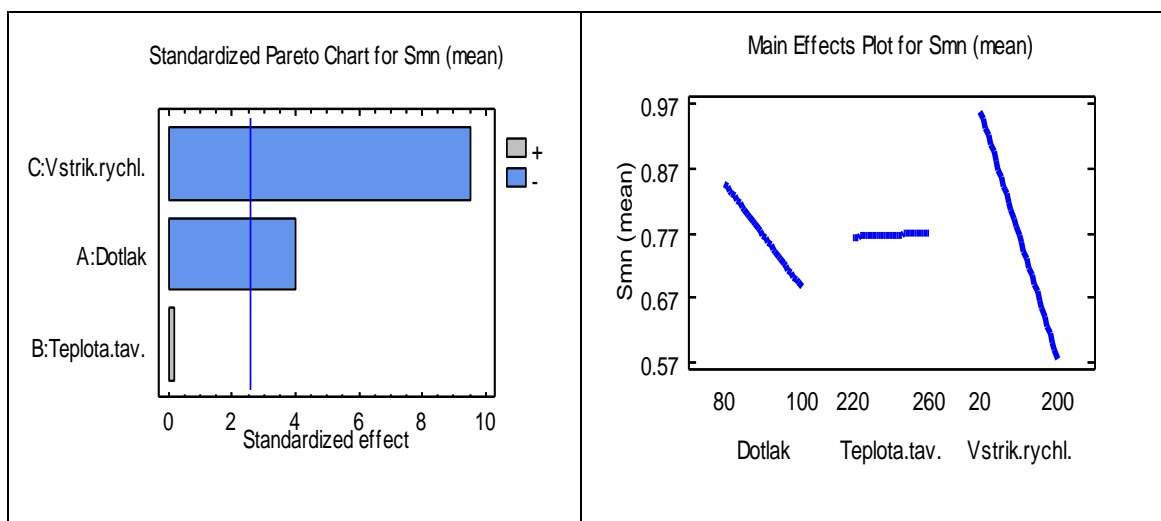
5.4.3.2 Vliv technologických parametrů na smrštění v příčném směru S_{Mn}

V dalším kroku byl vyhodnocen vliv dotlaku, teploty taveniny a vstřikovací rychlosti na smrštění v příčném směru. Výsledky jsou uvedeny v tab. 48.

Tab. 48: Výsledky analýzy rozptylu dat a modelu experimentu

Analysis of Variance for S_{Mn} (mean)					
<i>Source</i>	<i>Sum of Squares</i>	<i>Df</i>	<i>Mean Square</i>	<i>F-Ratio</i>	<i>P-Value</i>
A:Dotlak	0.0384	1	0.0384	16.00	0.0103
B:Teplota.tav.	0.0000601667	1	0.0000601667	0.03	0.8804
C:Vstrik.rychl.	0.218976	1	0.218976	91.21	0.0002
Total error	0.0120037	5	0.00240074		
Total (corr.)	0.26944	8			

Vliv uvažovaných parametrů je dále posouzen pomocí grafů:



Obr. 101: Paretův graf vlivu parametrů (vlevo) a graf hlavních efektů parametrů (vpravo)

Paretův graf ukazuje vliv jednotlivých parametrů na hodnoty smrštění v příčném směru, z grafu vyplývá:

- nejsilnější vliv je patrný u parametru vstřikovací rychlost
- výrazně slabší (ale rovněž statisticky významný) vliv je patrný u parametru dotlak, parametr teplota taveniny je nejslabší a statisticky nevýznamný
- parametry vstřikovací rychlost a dotlak snižují hodnoty sledované proměnné – S_{Mn} , tedy smrštění v příčném směru, parametr teplota taveniny naopak zvyšuje (velice slabě) hodnoty S_{Mn}

Obdobné závěry jsou patrné z grafu hlavních efektů parametrů.

Optimální nastavení všech tří parametrů pro dosažení požadovaného výsledku – minimální hodnoty smrštění v příčném směru, je uvedeno v tab. 49. Doporučené hodnoty byly stanoveny s ohledem na minimální průměrnou hodnotu smrštění v příčném směru.

Tab. 49: Optimální nastavení parametrů

Optimize Response			
Goal: minimize S_{Mn} (mean)			
Optimum value = 0.49168			
Factor	Low	High	Optimum
A: Dotlak	80.0	100.0	100.0
B: Teplota taveniny	220.0	260.0	220.0
C: Vstřikovací rychlost	20.0	200.0	200.0

Z tab. 49 je zřejmé, že:

- minimální hodnoty smrštění v podélném směru výlisek dosáhne při maximálních hodnotách dotlaku (100 %), minimální teplotě taveniny (220 °C) a maximální vstřikovací rychlosti (200 ccm.s⁻¹). Při takovém nastavení parametrů bude hodnota smrštění v podélném směru dosahovat průměrné hodnoty 0.49.

V tab. 50 jsou k dispozici vypočtené hodnoty regresních koeficientů a výsledná rovnice, popisující závislost smrštění v příčném směru na dotlaku, teplotě taveniny a vstřikovací rychlosti.

Tab. 50: Regresní koeficienty výsledného modelu

Regression coeffs. for S_{Mn} (mean)	
Coefficient	Estimate
constant	1.68051
A:Dotlak	-0.008
B:Teplota taveniny	0.000158333
C:Vstřikovací rychlost	-0.00211831

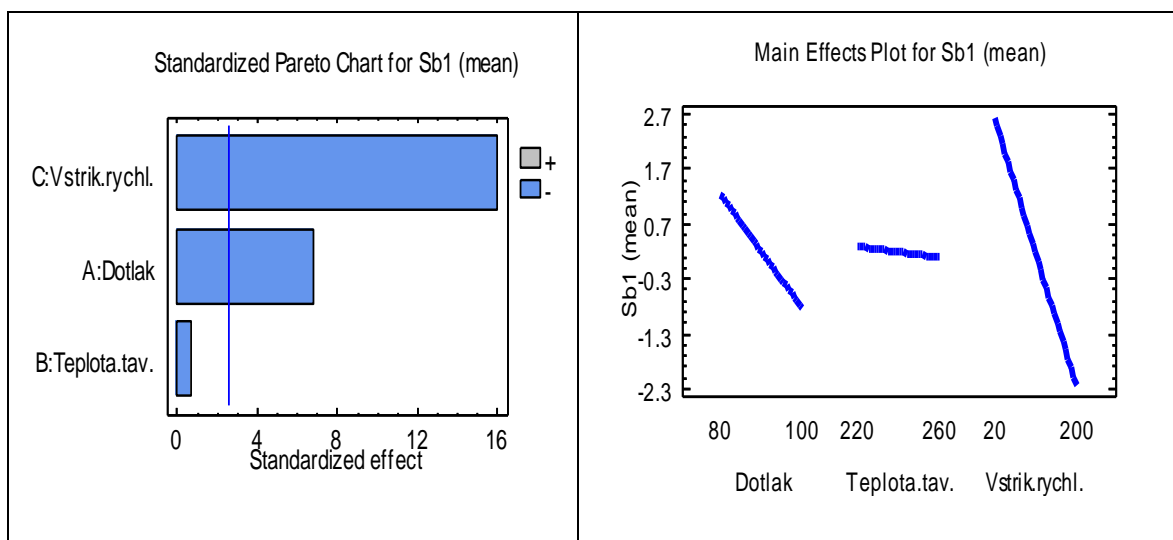
5.4.3.3 Vliv technologických parametrů na smrštění S_{b1}

Vyhodnocení vlivu vstřikovacích parametrů na smrštění S_{b1} . Výsledky jsou uvedeny v tab. 51:

Tab. 51: Výsledky analýzy rozptylu dat a modelu experimentu

Analysis of Variance for S_{b1} (mean)					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
A:Dotlak	6.48336	1	6.48336	46.07	0.0011
B:Teplota tav.	0.058806	1	0.058806	0.42	0.5465
C:Vstrik.rychl.	35.78	1	35.78	254.24	0.0000
Total error	0.703676	5	0.140735		
Total (corr.)	43.0258	8			

Vliv uvažovaných parametrů je dále posouzen pomocí grafů:



Obr. 102: Paretův graf vlivu parametrů (vlevo) a graf hlavních efektů parametrů (vpravo)

Z Paretova grafu je zřejmé:

- nejsilnější (a statisticky významný) vliv je patrný u parametru vstřikovací rychlost

- výrazně slabší (ale rovněž statisticky významný) je patrný vliv u parametru dotlak, parametr teplota taveniny je nejslabší a statisticky nevýznamný
- všechny parametry snižují hodnoty sledované proměnné – S_{b1}

Obdobné závěry jsou patrné z grafu hlavních efektů parametrů.

Optimální nastavení všech tří parametrů pro dosažení požadovaného výsledku – nulové hodnoty smrštění S_{b1} , je uvedeno v tab. 52:

Tab. 52: Optimální nastavení parametrů

Optimize Response			
Goal: maintain S_{b1} at 0.0 (mean)			
Optimum value = 0.0			
<i>Factor</i>	<i>Low</i>	<i>High</i>	Optimum
Dotlak	80.0	100.0	87.3849
Teplota taveniny	220.0	260.0	221.452
Vstřikovací rychlost	20.0	200.0	129.727

Z tab. 52 je zřejmé, že:

- nulové hodnoty smrštění S_{b1} výlisek dosáhne při hodnotách dotlaku 87.38 %, teplotě taveniny 221.45 °C a vstřikovací rychlosti 129.73 ccm.s⁻¹. Při takovém nastavení faktorů bude hodnota smrštění S_{b1} dosahovat průměrné hodnoty 0.

V tab. 53 jsou k dispozici vypočtené hodnoty regresních koeficientů a výsledná rovnice, popisující závislost smrštění S_{b1} na dotlaku, teplotě taveniny a vstřikovací rychlosti.

Tab. 53: Regresní koeficienty výsledného modelu

Regression coeffs. for S_{b1} (mean)	
Coefficient	Estimate
constant	13.6926
A:Dotlak	-0.10395
B:Teplota taveniny	-0.00495
C:Vstřikovací rychlost	-0.0270776

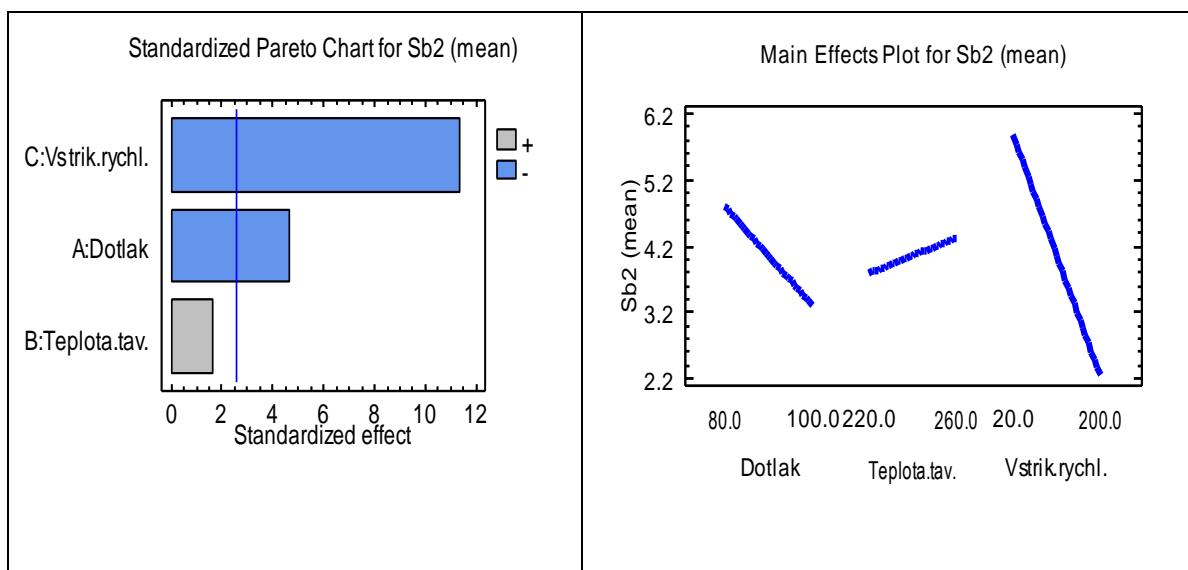
5.4.3.4 Vliv technologických proměnných na smrštění S_{b2}

Vyhodnocení vlivu vstřikovacích parametrů na smrštění S_{b2} . Výsledky jsou uvedeny v tab. 54:

Tab. 54: Výsledky analýzy rozptylu dat a modelu experimentu

Analysis of Variance for S_{b2} (mean)					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
A:Dotlak	3.30784	1	3.30784	21.41	0.0057
B:Teplota.tav.	0.418176	1	0.418176	2.71	0.1609
C:Vstrik.rychl.	19.7905	1	19.7905	128.09	0.0001
Total error	0.772512	5	0.154502		
Total (corr.)	24.2891	8			

Vliv uvažovaných parametrů je dále posouzen pomocí grafů:



Obr. 103: Paretův graf vlivu parametrů (vlevo) a graf hlavních efektů parametrů (vpravo)

Z Paretova grafu je zřejmé:

- nejsilnější (a statisticky významný) vliv je patrný u parametru vstřikovací rychlost
 - výrazně slabší (ale rovněž statisticky významný) je patrný vliv u parametru dotlak, parametr teplota taveniny je nejslabší a statisticky nevýznamný
 - parametry vstřikovací rychlost a dotlak snižují hodnoty sledované proměnné – S_{b2} , parametr teplota taveniny naopak zvyšuje (velice slabě) hodnoty S_{b2}
- Obdobné závěry jsou patrné z grafu hlavních efektů parametrů.

Optimální nastavení všech tří parametrů pro dosažení požadovaného výsledku – minimální hodnoty smrštění S_{b2} , je uvedeno v tab. 55:

Tab. 55: Optimální nastavení parametrů

Optimize Response			
Goal: minimize S_{b2} (mean)			
Optimum value = 1.21694			
Factor	Low	High	Optimum
A: Dotlak	80.0	100.0	100.0
B: Teplota taveniny	220.0	260.0	220.0
C: Vstřikovací rychlost	20.0	200.0	200.0

Z tab. 55 je zřejmé, že:

- minimální hodnoty smrštění S_{b2} výlisek dosáhne při maximálních hodnotách dotlaku (100 %), minimální teplotě taveniny (220 °C) a maximální vstřikovací rychlosti 200 ccm.s⁻¹. Při takovém nastavení parametrů bude hodnota smrštění S_{b2} dosahovat průměrné hodnoty 1.22.

V tab. 56 jsou k dispozici vypočtené hodnoty regresních koeficientů a výsledná rovnice, popisující závislost smrštění S_{b2} na dotlaku, teplotě taveniny a vstřikovací rychlosti.

Tab. 56: Regresní koeficienty výsledného modelu

Regression coeffs. for S_{b2} (mean)	
Coefficient	Estimate
constant	9.76557
A:Dotlak	-0.07425
B:Teplota taveniny	0.0132
C:Vstřikovací rychlost	-0.0201381

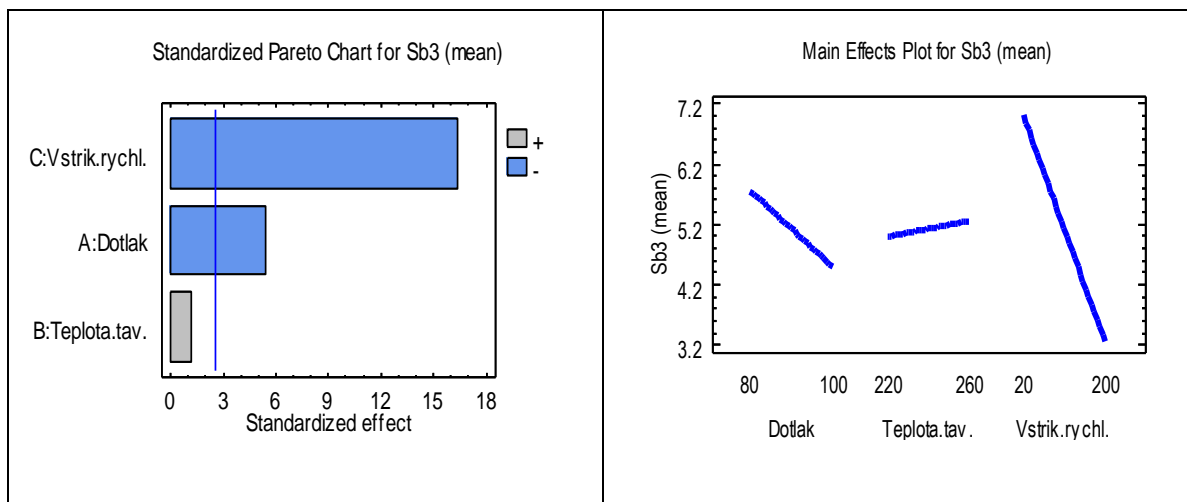
5.4.3.5 Vliv technologických parametrů na smrštění S_{b3}

Vyhodnocení vlivu vstřikovacích parametrů na smrštění S_{b3} . Výsledky jsou uvedeny v tab. 57.

Tab. 57: Výsledky analýzy rozptylu dat a modelu experimentu

Analysis of Variance for S_{b3} (mean)					
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
A:Dotlak	2.35877	1	2.35877	29.57	0.0029
B:Teplota.tav.	0.104544	1	0.104544	1.31	0.3041
C:Vstrik.rychl.	21.3071	1	21.3071	267.13	0.0000
Total error	0.398815	5	0.079763		
Total (corr.)	24.1693	8			

Vliv uvažovaných parametrů je dále posouzen pomocí grafů:



Obr. 104: Paretův graf vlivu parametrů (vlevo) a graf hlavních efektů parametrů (vpravo)

Z Paretova grafu je zřejmé:

- nejsilnější (a statisticky významný) vliv je patrný u parametru vstřikovací rychlost

- výrazně slabší (ale rovněž statisticky významný) je patrný vliv u parametru dotlak, parametr teplota taveniny je nejslabší a statisticky nevýznamný.
 - parametry vstřikovací rychlost a dotlak snižují hodnoty sledované proměnné – S_{b3} , parametr teplota taveniny naopak zvyšuje (slabě) hodnoty S_{b3}
- Obdobné závěry jsou patrné z grafu hlavních efektů parametrů.

Optimální nastavení všech tří parametrů pro dosažení požadovaného výsledku – minimální hodnoty smrštění S_{b3} , je uvedeno v tab. 58

Tab. 58: Optimální nastavení parametrů

Optimize Response			
Goal: minimize S_{b3} (mean)			
Optimum value = 2.47175			
Factor	Low	High	Optimum
A: Dotlak	80.0	100.0	100.0
B: Teplota taveniny	220.0	260.0	220.0
C: Vstřikovací rychlost	20.0	200.0	200.0

Z tab. 58 je zřejmé, že:

- minimální hodnoty smrštění S_{b3} výlisek dosáhne při maximálních hodnotách dotlaku (100 %), minimální teploty taveniny (220 °C) a maximální vstřikovací rychlosti (200 ccm.s⁻¹). Při takovém nastavení parametrů bude hodnota smrštění S_{b3} dosahovat průměrné hodnoty 2.47.

V tab. 59 jsou k dispozici vypočtené hodnoty regresních koeficientů a výsledná rovnice, popisující závislost smrštění S_{b3} na dotlaku, teplotě taveniny a vstřikovací rychlosti.

Tab. 59: Regresní koeficienty výsledného modelu

Regression coeffs. for S_{b3} (mean)	
<i>Coefficient</i>	<i>Estimate</i>
constant	11.4689
A:Dotlak	-0.0627
B:Teplota taveniny	0.0066
C:Vstřikovací rychlost.	-0.0208955

6. DISKUZE VÝSLEDKŮ

Výsledky výzkumné části disertační práce jsou rozděleny do dvou oblastí a poskytují částečné poznatky ve vazbě na rozměrové změny plastových dílů vyráběných technologií vstřikování pro vybrané konstrukční, materiálové a procesní parametry. Nejprve byl hodnocen průběh tlaku uvnitř dutiny formy pro různé kombinace zkoumaných technologických parametrů v závislosti na vzdálenosti od vtokového ústí. Reálný průběh tlaku uvnitř dutiny formy při vstřikovacím cyklu je důležitým ukazatelem kvality a stability procesu a má významný vliv na finální rozměry plastového dílu. Dále byly stanoveny hodnoty lineárního a lokálního smrštění získané pro identické kombinace technologických parametrů jako v předchozí části. Tyto výsledky byly následně vyhodnoceny statistickou analýzou plánovaného experimentu typu DOE, sestaveného s cílem vyhodnocení vlivu vybraných technologických parametrů na celkem pět sledovaných proměnných hodnot lineárního a lokálního smrštění, charakterizujících rozměrovou stabilitu vstřikované zkušební destičky.

Pro výzkum průběhu tlaku uvnitř dutiny formy a hodnot smrštění byl použit semikrystalický polymer -polypropylen- ve třech různých modifikacích, u kterých byly předpokladem odlišné výsledné rozměrové charakteristiky v důsledku vstřikovacího procesu.

Velmi důležitým aspektem této výzkumné práce byl návrh, konstrukce a výroba vstřikovacího nástroje, umožňujícího výzkum termodynamických veličin uvnitř dutiny formy zaregistrované Úřadem průmyslového vlastnictví jako užitný vzor... V současné době neexistuje obdobné řešení výroby vzorků pro zkoušky plnění dutiny formy různé tloušťky a různých polymerů za současného měření teploty i tlaku uvnitř dutiny formy. Toto měření je zajištěno zavedením tří teplotně-tlakových čidel Kistler přímo do dutiny formy, které snímají současně tlak v dutině formy a teplotu taveniny polymeru při procesu vstřikování. V tomto ohledu je překládané řešení zcela nové a ojedinělé. U takto vyrobených zkušebních vzorků jsou zaručeny srovnatelné podmínky při jejich výrobě a výsledky měření prováděných na těchto vzorcích vykazují proto vyšší spolehlivost a nejsou zatíženy chybou.

Výsledky v rámci výzkumu předkládané disertační práce jsou získané na zkušebních vzorcích jednoduchého obdélníkového tvaru vyrobených na jednootiskovém nástroji. V praxi se lze ve větší míře setkat s tvarově složitějšími

plastovými díly, vyráběných na nástrojích s více tvarovými dutinami. Přesto lze získané výsledky použít pro predikci rozměrových změn i u těchto tvarově komplexnějších dílů používaných v technické praxi.

6.1 Diskuze výsledků průběhu tlaku uvnitř dutiny formy pro materiál

Dow PPH 734-52RNA

V souladu s teoretickými poznatky byl vyhodnocením získaných tlakových křivek zjištěn klesající tlakový gradient směrem od vtokového ústí ke konci tokové dráhy. U všech parametrických kombinací byl v oblasti vtokového ústí pokles tlaku přerušen druhým tlakovým maximem, kde lze předpokládat zatuhnutí vtoku. Průběh tlaku zaznamenaný tlakovými čidly umístěnými ve středu tokové dráhy a na konci toku tento jev nevykazoval a křivky po dosažení tlakového maxima plynule klesaly na reziduální hodnotu tlaku. Z toho lze usuzovat, že došlo k rychlému zatuhnutí taveniny mezi oblastí u vtokového ústí a středem dráhy a omezení působení dotlaku na taveninu za touto oblastí a tedy k rozdílným termodynamickým podmínkám v různých místech uvnitř dutiny formy. Velké rozdíly tlakového gradientu mezi oblastí u vtokového ústí a vzdálenějšími pozicemi byly zjištěny při nižších vstřikovacích rychlostech ($20 \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; $100 \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) kdy tavenina rychle tuhla od nejvíce vzdáleného místa směrem k vtokovému ústí, kde docházelo k nejúčinnější tlakové odezvě. Z hlediska rozměrové stability vstřikovaných dílů to znamená značné difference hodnot lokálního smrštění tloušťky mezi oblastí u vtokového ústí a vzdálenějšími body.

U žádné parametrické kombinace nebylo prokázáno přeplnění formy, tlak zachycený jednotlivými klesal na zbytkové hodnoty před ukončením vstřikovacího cyklu a otevření formy. Z výsledků je zřejmé, že stanovená doba dotlaku metodou sledování hmotnosti výstřiku pro předpokládanou parametrickou kombinaci přibližně odpovídá reálnému ději uvnitř dutiny formy.

6.2 Diskuze výsledků průběhu tlaku uvnitř dutiny formy pro materiál PP

Scofin 54 T 10-0

Vyhodnocením získaných tlakových křivek byl zjištěn klesající tlakový gradient směrem od vtokového ústí ke konci tokové dráhy u polypropylenu plněného 40% minerálního plniva talku. Při nejvýše nastavené teplotě taveniny 260°C byl v oblasti vtokového ústí prokázán pozvolný tlakový pokles až do okamžiku zatuhnutí vtoku s následným prudkým tlakovým propadem na reziduální hodnotu.

Tlakové profily zaznamenané ve středu a na konci tokové dráhy vykazovaly poměrně vyrovnaný průběh u nastavovaných parametrů se vstřikovací rychlostí do 100 ccm.s^{-1} a po dosažení maximální hodnoty strmě klesaly na zbytkovou hodnotu. Ze získaných dat vyplývá, že rozměry v různých místech vstřikovaného dílu budou dosahovat odlišných hodnot. Značný rozdíl v hodnotách lokálního smrštění tloušťky lze na základě tlakového gradientu predikovat mezi oblastí vtokového ústí a vzdálenějšími body výstřiku, kde rozměrové změny nebudou příliš markantní. Tlak v dutině formy klesal na zbytkové hodnoty před dokončením dotlakové fáze u všech nastavených kombinací technologických parametrů. Je tedy zřejmé, že doba dotlaku může být významně zkrácena.

6.3 Diskuze výsledků průběhu tlaku uvnitř dutiny formy pro materiál PP Scolefin 54 T 10-0

V souladu s teoretickými poznatky byl vyhodnocením získaných tlakových křivek u materiálu plněného 40% skleněných vláken zjištěn klesající tlakový gradient směrem od vtokového ústí ke konci tokové dráhy. Tlakový průběh v jednotlivých místech dutiny formy byl velmi závislý na nastavené teplotě taveniny. S rostoucí teplotou taveniny se zvyšovala doba působení tlaku na taveniny u vtokového ústí, zatímco v ostatních kontrolovaných pozicích tlak strmě klesal na zbytkové hodnoty. Ze zaznamenaných výsledků lze pozorovat významné tlakové ztráty mezi nastaveným vstřikovacím tlakem a reálným tlakem uvnitř dutiny formy, způsobené vysokou viskozitou vstřikovaného polymeru. Takto výrazný tlakový pokles má za následek vyšší hodnoty lokálního smrštění, jejichž hodnota se zvyšuje s rostoucí vzdáleností od vtoku. V praxi většinou není předpokládáno s tak významnými tlakovými ztrátami a to může mít za následek nevhodně zvolené technologické parametry a následné nepředpokládané rozměrové změny.

6.4 Diskuze vlivu technologických parametrů na lokální, podélné a příčné smrštění

Rozměrová stabilita zkušebních destiček byla charakterizována pomocí pěti sledovaných rozměrů – smrštění v podélném směru (S_{Mp}), smrštění v příčném směru (S_{Mn}), lokální smrštění tloušťky v oblasti vtokového ústí (S_{b1}), lokální smrštění ve středu tokové dráhy (S_{b2}) a lokální smrštění u konce dráhy toku (S_{b3}).

U neplněného polypropylenu nebyla zjištěna významná anizotropie, výsledné hodnoty se pohybovaly mezích daných pro tento typ polymeru. Rovněž

polypropylen plněný 40% talku neprokázal anizotropii, naopak při maximální hodnotě dotlaku a vysoké vstřikovací rychlosti bylo zjištěno izotropní smrštění. K významné anizotropii docházelo dle teoretických předpokladů u polypropylenu plněného 40% skleněných vláken a pohybovala se v rozmezí 48,5 – 74,7 %. Anizotropie se zvyšovala s klesající vstřikovací rychlostí v důsledku vyššího smrštění v příčném směru.

Porovnáním výsledků lokálního smrštění tloušťky se zachycenými tlakovými gradienty u všech testovaných materiálů bylo potvrzeno, že s klesající hodnotou tlaku působícího na taveninu v dutině formy roste hodnota lokálního smrštění podél tokové dráhy směrem k nejvíce vzdálenému místu od vtoku. U některých parametrických kombinací bylo naměřeno negativní smrštění v oblasti vtokového ústí a jeho hodnota významně rostla se zvyšující se vstřikovací rychlostí a velikostí dotlaku. Negativní smrštění bylo naměřeno i uprostřed tokové dráhy při vyšších hladinách dotlaku v kombinaci s vysokou vstřikovací rychlostí u neplněného polymeru. Tento jev lze vysvětlit snížením viskozity polymeru vlivem frikčního tepla vyvolaného vysokou vstřikovací rychlostí a prodloužením tlakového efektu v dutině formy. To mělo za následek vyšší hodnotu tlakového integrálu během dotlakové fáze. Polymer byl v momentě zatuhnutí vtokového ústí přeplněn a tepelná kontrakce vyvolaná chladnutím taveniny nebyla schopna překonat působení zbytkového tlaku. Negativní smrštění je pravděpodobně výsledkem výše popsaných dějů.



U plněných polymerů byly naměřeny značně vyšší hodnoty lokálního smrštění v komparaci s neplněným materiálem. Porovnáním naměřených hodnot smrštění s tlakovými gradienty je zřejmé, že u plněných materiálů dochází k značnému tlakovému poklesu průchodem taveniny vtokovým ústím, což limituje efektivní působení tlaku na polymer v dutině formy.

Vyhodnocením naměřených výsledků statistickou analýzou byl určen vliv zkoumaných technologických parametrů na sledované rozměry zkušebního tělesa. Dále bylo navrženo optimální nastavení těchto parametrů s cílem dosáhnout minimální zjištěné hodnoty výrobního smrštění. Negativní hodnoty smrštění jsou většinou v praxi nepřipustné. Proto byla s ohledem na tuto skutečnost hledána optimální parametrická kombinace, pro kterou bude dosaženo nulové hodnoty lokálního smrštění v pozicích, kde byla naměřena hodnota negativního smrštění.
















6.4.1 Vliv technologických parametrů na lokální, podélné a příčné smrštění pro materiál Dow PPH 734- 52RNA

Výsledky statistické analýzy prokázaly, že zvyšující se hodnoty všech daných zkoumaných technologických parametrů snižují hodnoty příčného i podélného smrštění. Nejsilnější vliv byl prokázán u parametru vstřikovací rychlost. Slabší vliv pak byl zjištěn u dvojice parametrů dotlak a teplota taveniny.

Snížení hodnoty lokální smrštění všech kontrolovaných pozic bylo docíleno zvyšováním parametrů vstřikovací rychlost a dotlak. Naopak zvyšováním hodnoty parametru teplota taveniny se hodnoty lokálního smrštění zvyšovaly.

Vliv jednotlivých parametrů na podélné, příčné a lokální výrobní smrštění je shrnut v tabulce 60: šipky naznačují, jak konkrétní technologický parametr ovlivňuje výrobní smrštění:  - zvyšuje hodnotu  - snižuje hodnotu smrštění

Tab. 60: Vliv parametrů na výrobní smrštění

Parametr	S_{Mp}	S_{Mn}	S_{b1}	S_{b2}	S_{b3}
Dotlak					
Teplota taveniny					
Vstřikovací rychlost					

Optimální nastavení technologických parametrů pro docílení minimálních nezáporných hodnot výrobního smrštění je uvedeno v tabulce 61:

Tab. 61: Optimální nastavení technologických parametrů

Parametr	S_{Mp}	S_{Mn}	S_{b1}	S_{b2}	S_{b3}
Dotlak	100	100	91	90	100
Teplota taveniny	260	260	248	230	220
Vstřikovací rychlost	200	200	41	178	200

Závislost smrštění na zkoumaných technologických parametrech lze vyjádřit následujícími rovnicemi. Dosazením hodnot parametrů z tab. 61 lze získat průměrnou minimální hodnotu smrštění v dané pozici.

$$S_{Mp} = 2.58223 - 0.00305.Dt - 0.00358333.Tt - 0.00192145.Vr \quad (33)$$

$$S_{Mn} = 2.32552 - 0.00446667.Dt - 0.001675.Tt - 0.00258716.Vr \quad (34)$$

$$S_{b1} = -5.21184 - 0.0396.Dt + 0.0396.Tt - 0.0243578.Vr \quad (35)$$



$$S_{b2} = 6.2022 - 0.0506.Dt + 0.0132.Tt - 0.0188893.Vr \quad (36)$$

$$S_{b3} = 5.77148 - 0.07425.D + 0.02475.Tt - 0.0157967.Vr \quad (37)$$
















Kde: Dt – dotlak; Tt – teplota taveniny; Vr – vstřikovací rychlost

6.4.2 Vliv technologických parametrů na lokální, podélné a příčné smrštění pro materiál PP Scolefin 54 T 10-0

Výsledky statistické analýzy prokázaly, že zvyšující se hodnoty daných parametrů dotlak a vstřikovací rychlost snižují hodnoty lokálního, příčného i podélného smrštění. Nejsilnější vliv byl zjištěn u parametru vstřikovací rychlost. Slabší vliv pak byl zjištěn u parametru dotlak. Parametr teplota taveniny naopak slabě zvyšoval hodnoty smrštění u všech kontrolovaných pozic.

Vliv jednotlivých parametrů na podélné, příčné a lokální výrobní smrštění je shrnut v tabulce 62: šipky naznačují, jak konkrétní technologický parametr ovlivňuje výrobní smrštění:  - zvyšuje hodnotu smrštění  - snižuje hodnotu smrštění

Tab. 62: Vliv parametrů na výrobní smrštění

Parametr	S_{Mp}	S_{Mn}	S_{b1}	S_{b2}	S_{b3}
Dotlak					
Teplota taveniny					
Vstřikovací rychlost					

Optimální nastavení technologických parametrů pro docílení minimálních nezáporných hodnot výrobního smrštění je uvedeno v tabulce 63:

Tab. 63: Optimální nastavení technologických parametrů

Parametr	S_{Mp}	S_{Mn}	S_{b1}	S_{b2}	S_{b3}
Dotlak	100	100	91	100	100
Teplota taveniny	220	220	244	220	220

Vstřikovací rychlost	200	200	79	200	200
----------------------	-----	-----	----	-----	-----

Závislost smrštění na zkoumaných technologických parametrech lze vyjádřit následujícími rovnicemi. Dosazením hodnot parametrů z tab. 63 lze získat průměrnou minimální hodnotu smrštění v dané pozici.

$$S_{Mp} = 1.35127 - 0.00375.Dt + 0.00023333.Tt - 0.0019791.Vr \quad (38)$$

$$S_{Mn} = 1.70481 - 0.00771667.Dt + 0.000891667.Tt - 0.00239454.Vr \quad (39)$$

$$S_{b1} = 8.86348 - 0.0792.Dt + 0.000825.Tt - 0.0236951.Vr \quad (40)$$

$$S_{b2} = 5.09904 - 0.04455.Dt + 0.01485.Tt - 0.0174332.Vr \quad (41)$$



$$S_{b3} = 8.50643 - 0.0495.Dt + 0.009075.Tt - 0.0199352.Vr \quad (42)$$

Kde: Dt – dotlak; Tt – teplota taveniny; Vr – vstřikovací rychlost



6.4.3 Vliv technologických parametrů na lokální, podélné a příčné smrštění pro materiál PP Scolefin 34 G 10-0

Výsledky statistické analýzy prokázaly, že zvyšující se hodnoty všech daných parametrů snižují hodnotu podélného smrštění. Nejsilnější vliv byl zjištěn u parametru teplota taveniny. Slabší vliv pak byl zjištěn u parametru dotlak a vstřikovací rychlost.

Výslednou hodnotu příčného smrštění a lokálního smrštění S_{b2} , S_{b3} snižovala dvojice parametrů dotlak a vstřikovací rychlost, parametr teplota taveniny naopak slabě zvyšoval hodnoty smrštění u všech kontrolovaných pozic.

Vliv jednotlivých parametrů na podélné, příčné a lokální výrobní smrštění je shrnut v tabulce 64: šipky naznačují, jak konkrétní technologický parametr ovlivňuje výrobní smrštění:  - zvyšuje hodnotu smrštění -  - snižuje hodnotu smrštění

Tab. 64: Vliv parametrů na výrobní smrštění

Parametr	S_{Mp}	S_{Mn}	S_{b1}	S_{b2}	S_{b3}
Dotlak					
Teplota taveniny					

Vstřikovací rychlost	↓	↓	↓	↓	↓
----------------------	---	---	---	---	---

Optimální nastavení technologických parametrů pro docílení minimálních nezáporných hodnot výrobního smrštění je uvedeno v tabulce 65:

Tab. 65: Optimální nastavení technologických parametrů

Parametr	S_{Mp}	S_{Mn}	S_{b1}	S_{b2}	S_{b3}
Dotlak	100	100	87	100	100
Teplota taveniny	260	220	221	220	220
Vstřikovací rychlost	200	200	130	200	200

Závislost smrštění na zkoumaných technologických parametrech lze vyjádřit následujícími rovnicemi. Dosazením hodnot parametrů z tab. 65 lze získat průměrnou minimální hodnotu smrštění v dané pozici.

$$S_{Mp} = 0.886716 - 0.0018.Dt - 0.00184167.Tt - 0.000151503.Vr \quad (43)$$

$$S_{Mn} = 1.68051 - 0.008.Dt + 0.000158333.Tt - 0.00211831.Vr \quad (44)$$

$$S_{b1} = 13.6926 - 0.10395.Dt - 0.00495.Tt - 0.0270776.Vr \quad (45)$$

$$S_{b2} = 9.76557 - 0.07425.Dt + 0.0132.Tt - 0.0201381.Vr \quad (46)$$

$$S_{b3} = 11.4689 - 0.0627.Dt + 0.0066.Tt - 0.0208955.Vr \quad (47)$$

Kde: Dt – dotlak; Tt – teplota taveniny; Vr – vstřikovací rychlost

6.4.4. Shrnutí vlivu vstřikovacích parametrů na lokální, podélné a příčné smrštění

V souladu s teoretickým předpokladem klesala hodnota smrštění se zvyšující se hodnotou dotlaku. Vliv vstřikovací rychlosti na smrštění bývá v odborné literatuře popsán jako nejednoznačný a obecně není pro smrštění uvažován. Výsledky této práce ukazují v rozporu s teorií na významný vliv vstřikovací rychlosti na smrštění vstřikovaných dílů. Vysvětlení tohoto jevu je možné charakterizovat sekundárním

zvýšením teploty taveniny vlivem smykového tření. V důsledku snížení viskozity materiálu se zvyšuje efektivita dotlaku s výslednou redukcí smrštění. Důsledky těchto jevů jsou při daných podmínkách překonat vliv ostatních technologických parametrů. Teplota taveniny nastavovaná v maximálním rozsahu teplot doporučených výrobcem měla velmi slabý vliv na smrštění a obecně mírně zvyšovala hodnoty lokálního smrštění tloušťky. To lze vysvětlit zvýšenou tepelnou kontrakcí taveniny v dutině vstřikovací formy, která byla do značné míry eliminována dotlakem.

7. ZÁVĚR

Výzkum vlivu vstřikovacích parametrů na podélné, příčné a lokální smrštění vstřikovaných dílů v předkládané disertační práci rozšiřuje znalosti v oboru problematiky rozměrových změn plastových výstřiků.

Výzkumná část práce posuzuje a diskutuje vliv volených technologických parametrů na výrobní smrštění zkušebních těles vyráběných na speciální vstřikovací formě umožňující monitorování tlakové historie uvnitř dutiny formy. Výrobní smrštění je hodnoceno na zkušebních těles o rozměru 150 x 60 x 2 mm plněných filmovým vtokem o tloušťce 0,85 mm v celé šířce.

Výsledky práce lze shrnout do následujících bodů:

1. V provedené rešerši jsou popsány veškeré dostupné základní poznatky v souvislosti se smrštěním termoplastů zpracovávaných technologií vstřikování. Jednotlivé kapitoly charakterizují vlivy materiálových, fyzikálních, konstrukčních a procesních parametrů na smrštění. S přihlédnutím na zaměření této práce byl důkladně rozebrán vliv technologických parametrů na smrštění spolu s popisem tlakových dějů uvnitř dutiny formy
2. V rámci experimentu byla navržena a vyrobena speciální vstřikovací forma ke sledování tlakových dějů uvnitř dutiny formy
3. Ze získaných dat průběhu tlaku byla analyzována tlaková historie uvnitř dutiny formy v různých vzdálenostech od vtokového ústí. Průběhy tlakových integrálů byly komparovány s naměřenými hodnotami lokálního

smrštění a diskutovány v kapitole 6.1 – 6.3. Tlakové průběhy jsou zobrazeny pomocí grafů v kapitole 4.1

4. Výsledky smrštění byly vyhodnoceny statistickou analýzou plánovaného experimentu typu DOE, sestaveného s cílem vyhodnocení vlivu tří technologických faktorů na celkem pět sledovaných proměnných, charakterizujících podélné, příčné a lokální smrštění. V rámci experimentu bylo prokázáno, že vstřikovací rychlost je parametrem nejvíce ovlivňujícím smrštění.

Důležitým výstupem vědecké práce je zápis **užitého vzoru číslo 27433 - Vstřikovací forma pro zkušební destičku.**

8. PŘÍNOSY DISERTAČNÍ PRÁCE

Hlavní přínosy disertační práce spočívají v získání nových znalostí v oblasti rozměrových změn vstřikovaných dílů určených pro náročné technické aplikace. Z provedeného rozboru dosavadních poznatků vyplývá, že dosud není jednoznačně určen vliv technologických parametrů na smrštění vstřikovaných dílů a některé provedené studie na toto téma se v závěrech rozcházejí. Zjištěné hodnoty smrštění při různých termodynamických podmínkách byly testovány na polypropylenu ve třech modifikacích a poskytují relativně jasnou ideu o rozměrové integritě vstřikovaného dílu vyráběného jak z plněných, tak neplněných polymerů.

Přínosy pro vědu jsou stručně shrnuty v následujících bodech:

- Podrobný rozbor všech atributů ovlivňujících smrštění vstřikovaných dílů
- Rozšíření poznatků o průběhu tlaku uvnitř dutiny formy
- Stanovení vlivu tlaku uvnitř dutiny formy na lokální smrštění vstřikovaného dílu
- Stanovení vlivu vstřikovacích parametrů na podélné, příčné a lokální smrštění
- Získání nových poznatků o vlivu vstřikovací rychlosti a teplotě taveniny na smrštění
- Matematický popis pro predikci hodnot smrštění vstřikovaných dílů při různých provozních nastavení vstřikovacích parametrů

Přínosy pro praxi jsou charakterizovány v následujících bodech

- Stanovení optimální kombinace technologických parametrů s cílem dosáhnout co nejnižších hodnot smrštění
- Návrh a konstrukce vstřikovací formy pro sledování reologických, tlakových a teplotních poměrů v dutině formy

Výsledky této práce poskytnou důležité poznatky pro optimalizaci technologických parametrů při vstřikování přesných dílů. Dále mohou být důležitým vodítkem pro konstruktéry vstřikovacích nástrojů pro korekci rozměrů tvarových částí formy nebo rozměrů vstřikovaných dílů.

9. DOPORUČENÍ PRO DALŠÍ VÝZKUM

Předkládaná disertační práce řeší jen určitou oblast konstrukčních, materiálových a procesních faktorů, které ovlivňují smrštění vstřikovaných dílů. Dalším krokem ve výzkumu by mohlo být stanovení vlivu technologických parametrů na smrštění pro jiné síly stěny zkušebních těles tak, aby byl pokryt rozsah tloušťek vstřikovaných dílů v technické praxi a byly do výzkumu zahrnuty jak tenkostěnné, tak silnostěnné výstřiky. V předkládané práci byl analyzován vliv vstřikovacích parametrů na smrštění pouze u semikrystalického polymeru. Pro získání komplexnějších informací v souvislosti s rozměrovými změnami by bylo vhodné provést experimentální měření i na amorfním polymeru. Vhodným materiálem by mohl být například ABS, nebo polykarbonát. Oba materiály jsou hojně používány v technické praxi. Především využití polykarbonátu pro výrobu primárních optických dílů v automobilovém průmyslu vyžaduje velmi striktní rozměrové požadavky. Pro důkladnější analýzu dějů uvnitř formy by bylo zajímavé vyhodnotit kromě tlakových integrálů i teplotní historii pomocí kombinovaných čidel. Rozsah nastavovaných parametrů a jejich kombinací plně nezahrnuje všechny proměnné faktory. Lze tedy doporučit zahrnout do výzkumu další technologické parametry mající vliv na smrštění, například teplotu temperačního média nebo různé doby dotlaku.

10. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] CAMPO, E.A.: Industrial Polymers. Hanser Gardner Publication, 2008. ISBN 978-1-56990-409-1
- [2] MLEZIVA, J.; ŠŇUPÁLEK, J.: Polymery-výroba, struktura, vlastnosti a použití. Sobotáles, 2000. ISBN 80-85920-72-7
- [3] SOVA, M.; KREBS, J.: Termoplasty v praxi. Verlag Dashoefer, Praha, 2002.
- [4] <http://en.wikipedia.org/wiki/Talc>
- [5] KARIAN, H.G.: Handbook of Polypropylene and Polypropylene Composites, Revised and Expanded. CRC Press, 2003. ISBN 9780824740641
- [6] KANT, S.; URMILA; KUMAR, J., PUNDIR, G.: Study of Talc Filled Polypropylene- A Concept For Improving Mechanical Properties of Polypropylene. IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology. ISSN: 2319-1163
- [7] EHRENSTEIN, Gottfried W. Polymerní kompozitní materialy : Materialy, zpracování, vlastnosti. Praha : Scientia, 2009. 343 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [8] KOLOUCH, J.: Strojírenské výrobky z plastů vyráběné vstřikováním. SNTL, Praha, 1986.
- [9] KREBS, J.: Teorie zpracování nekovových materiálů – část 1. TU v Liberci, Liberec, 2001. ISBN 80-7083-449-8.

-
- [10] LENFELD, Petr. *Technologie II.-2 část*. Liberec: TU v Liberci, 2005. 139 s. ISBN 80-7372-037-X
- [11] NGUYENA Nguyen, K.T. and Kamal, M.R., SPE ANTEC Tech. Papers, 33,218 (1987)
- [12] http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/04.htm
- [13] MANAS, M., VLCEK, J.: *Aplikovaná reologie*. 1. vyd. UTB Zlín, 2001. ISBN 80- 7318-039-1
- [14] BEAUMONT, J.P.; NAGEL, R.; SHERMAN, R.: *Successful Injection Molding – Process, Design, and Simulation*. Hanser Gardner Publication, Inc., Cincinnati, 2002. ISBN 1-56990-291-7.
- [15] BRUMEL, M. a kolektiv: *Rozměrově přesné výrobky z plastů*. Vydavatelství Úřadu pro normalizaci a měření, Praha, 1977.
- [16] BOBČÍK, L.: *Formy pro vstřikování plastů: I.díl - Vstřikování plastů*. Brno-Kníničky: [s.n.], 1998. 134 s.
- [17] BĚHÁLEK, L.: *Polymery*. Liberec, 2014 ISBN 978-80-88058-68-7
- [18] OSSWALD, T.; MENGES, G.: *Materials Science of Polymers for Engineers*. Carl Hanser Verlag, 2012. ISBN: 978-1-56990-514-2
- [19] FISCHER, J.M.: *Handbook of Molded Part Shrinkage and Warpage*. Plastics Design Library, 2003. ISBN 1-884207-72-3.
- [20] KAZMER, David. *Design with Plastic Focus: Injection Molding*. Prezentace [online]. Department of Plastics Engineering, University of Massachusetts, Lowell.
http://www.strojnistvo.com/arhiv/baza_znanja/Design%20with%20Plastics.pdf.
- [21] MEISSNER, B.; ZILVAR, V.: *Fyzika polymerů*. SNTL, Praha, 1987. ISBN 04-634-87.
- [22] DUCHÁČEK, V.: *Polymery-výroba, vlastnosti, zpracování použití*. VŠCHT v Praze, Praha, 2006. ISBN 80-7080-617-6
- [23] AHO, J.: *Rheological Characterization of Polymer Melts in Shear and Extension: Measurement Reliability and Data for Practical Processing*. Tampere University of Technology, Tampere 2011. ISBN 978-952-15-2583-4
- [24] WARD, I., M.; SWEENEY, J.: *An Introduction to the Mechanical Properties of Solid polymers*. Wiley, 2005. ISBN: 978-0-470-02037-1
-

- [25] Viskoelastické modely- Dostupné z URL:
http://ufmi.ft.utb.cz/texty/fyzika_pol/FP_09.pdf
- [26] Nenewtonovské kapaliny – Dostupné z URL:
<http://www.kme.zcu.cz/granty/biofrvs/pdf/4-01FRVS-03.pdf>
- [27] HISEM, P.: Vliv podmínek vstřikování na smrštění výstřiku z termoplastu. Disertační práce, TU v Liberci, Liberec, 2003.
- [28] LENFELD, P.: Technologie vstřikování. Liberec, 2014. ISBN: 978-80-88058-74-8
- [29] JANSEN, K.M.B. – Measurement and prediction of anisotropy in injection moulded PP products. Intern. Polym. Process.. vol. 13: n° 3 (1998), p. 309-317.
- [30] CHANG, T. C., FAISON, E. III – Shrinkage behavior and optimization of injection molded parts studied by the Taguchi Method. Polym. Eng. Sci.. vol. 41: n° 5 (2001), p. 703-710.
- [31] HARUTUN, G.K. – Chapter 19. Part Shrinkage Behavior of Polypropylene Resins and Polypropylene Composites. CRC Press 2003. ISBN: 978-0-203-91180-8
- [32] JANSEN, K. M. B. and VAN DIJK, D. - Shrinkage of Injection Moulded Fibre Composites - 66th annual meeting of the polymer processing society. Sweden, 1997, p. 3-4.
- [33] WEINLICH, P.: Rozměrové změny matric PP s nanoplnivem. Disertační práce, TU v Liberci, Liberec, 2008.
- [34] ZEMAN, L.: Vstřikování plastů. BEN-Technická literatura, 2009. ISBN: 978-80-7300-250-3
- [35] ZOLLNER, O.: Process Variables as Production Cost Factors in the Injection Moulding of Thermoplastics, ATI 916e, Bayer Application Technology Information.
- [36] SANTIS, F.; PANTANI, R.; SPERANZA, V.; TITOMANLIO, G.: As-molded shrinkage on industrial polypropylene injection molded parts: experiments and analysis. DICA, University of Salerno – via Ponte don Melillo, 84084 Fisciano SA Italy.
- [37] SPEIGHT, R.G.: Optimization of Velocity to Pressure Phase Transfer for the Polymer Injection Molding Process. Journal of Injection Molding Technology, March 1997, vol. 1, No. 1

- [38] MALLOY, R.A. - Plastic Part Design for Injection Molding: An Introduction. New York: Hansen (1994), p. 2, 64, 77. ISBN 1-56990-129-5.
- [39] SEYLER, R., ERIE, P. and SCHENCK, A.: Warpage Index Based on Cooling and Orientational Effects - Proceedings of 61st annual meeting of the Society of Plastic Engineers. Nashville, 2003, p. 3353-3357.
- [40] ZOLLNER, O.: – The fundamentals of shrinkage of thermoplastics. Bayer (2001).
- [41] GABRIEL, Jiří. Školící materiály “Kurz vstřikování plastů” firmy Kompozity Brno.
- [42] DuPont Delrin acetal resin Moulding Guide-Technical Information. Technické listy firmy DuPont, U.S.A.
- [43] JANSEN, K. M. B., VAN DIJK, D. J. and K, K. P. - Warpage of Injection Moulded Plates and Corner Products – Intern. Polymer Processing XIII(1998)
- [44] HOVAD, J.: Návrh technologie výroby plastového krytu vrtačky. Diplomová práce. VUT v Brně, Brno 2014.
- [45] GREENER, J.; WIMBERGER-FRIEDL, R.: Precision Injection Molding: Process, Material, and Applications, Hanser Gardner Publication, Cincinnati 2006. ISBN-13:978-3-446-21670-9
- [46] FILIP, P.: Quality Molding – Cavity Pressure Measurement – presentační materiály firmy Kistler
- [47] ČSN EN ISO 294-4: Plasty – Vstřikování zkušebních těles z termoplastů – část 4: Stanovení smrštění. Český normalizační institut, Praha, 2003.

11. PUBLIKAČNÍ ČINNOST K TÉMATU DISERTAČNÍ PRÁCE

- [1] ZÁBOJ, R. *The Influence of Process Conditions on the Local Shrinkage of the Injection Moulded Natural Fibre Composite with Polypropylene Matrix*. ICPME2015. WIT Transactions on Engineering Sciences. ISSN: 1743-3533.
- [2] ZÁBOJ, R. *The Influence of Process Conditions on the Local Shrinkage and on the Pressure Evolution Inside the Mold Cavity of the Injection Molded Polypropylene in Two Modifications - PP Homopolymer; 40% Talc Filled PP*. Key Engineering Materials. ISSN: 1662-9795. V tisku.
- [3] ZÁBOJ, R. *Vstřikovací forma pro zkušební destičku*. Užitný vzor – 27433, datum zápisu 27.10.2014.

12. SEZNAM PŘÍLOH A PŘÍLOHY

Seznam příloh:

Příloha 1 - Materiálový list pro materiál Dow PPH 734-52RNA

Příloha 2 - Materiálový list pro materiál PP Scolefin 54 T 10-0

Příloha 3 - Materiálový list pro materiál PP Scolefin 34 G 10-0

Příloha 1 - Materiálový list pro materiál Dow PPH 734-52RNA



DOW H734-52RNA Polypropylene Resin

Natural Polypropylene Homopolymer

DOW H734-52RNA Polypropylene Resin is a homopolymer developed for thin wall, high speed injection moulding.

DOW H734-52RNA Polypropylene Resin is a high flow homopolymer with a good balance of physical properties. DOW H734-52RNA Polypropylene Resin contains a very efficient antistatic package and offers good transparency when required. DOW H734-52RNA Polypropylene Resin is designed and formulated to allow for very easy processing, short cycle times, low shrinkage, minimal warpage and good part dimensional stability.

Applications for DOW H734-52RNA

Polypropylene Resin:

- Thin wall food packaging
- Thin wall cosmetic packaging
- Housewares
- Appliances
- Caps & closures
- Videocassette boxes
- Office accessories & pens

Properties	Units	Test Method	Value
Physical ⁽¹⁾			
Melt Flow Rate (230 °C, 2.16 kg)	g/10min	ISO 1133	52
Density	g/cm ³	ISO 1183	0.9
Mechanical ^(1,2)			
Flexural Modulus	MPa	ISO 178	1650
Tensile Strength at Yield	MPa	ISO 527-2	37
Tensile Elongation at Yield	%	ISO 527-2	9
Thermal ^(1,2)			
HDT B (0.45 MPa) ⁽³⁾	°C	ISO 75/B	105
Vicat Softening Point A (10 N)	°C	ISO 306/A	152
Impact ^(1,2)			
CHARPY (notched) Impact Strength (23 °C)	kJ/m ²	ISO 179-1/1eA	2.5

⁽¹⁾ Typical values; not to be construed as specification limits.

⁽²⁾ Injection moulded specimens.

⁽³⁾ Unannealed specimens.

Regulatory Information

DOW H734-52RNA Polypropylene Resin should comply with FDA and most European food regulations. It is the responsibility of the manufacturers of food contact articles and industrial food packers to make sure the articles in their actual use are in compliance with the imposed migration requirements. The appropriate regulations should be consulted for more detailed information. Compliance letters can be obtained through the Dow sales representative.

See "Safety and Handling Considerations"

* Trademark of The Dow Chemical Company

CH 260-095-E-0704
260-09501



Scolefin® 54 T 10-0

Polypropylene
Prime Compound

Description:

PPH, 40% mineral filled, natural

General

MFI (230°/2,16kg)	ISO 1133	17.5	g/10min
Density	ISO 1183	1.2	g/cm ³

Thermal

HDT/A (1,8 MPa)	DIN en ISO 75	85	°C
-----------------	---------------	----	----

Mechanical

Izod notched impact strength (23°C)	ISO 180	2.8	kJ/m ²
Charpy unnotched impact strength (23 °C)	ISO 179	15	kJ/m ²
Charpy notched impact strength (23°C)	ISO 179/1eA	2.0	kJ/m ²
Tensile strength at yield (50 mm/min)	ISO 527	32	N/mm ²
E-modulus	ISO 527	4000	N/mm ²

Datasheet

The data and information contained herein are typical average values, based on our current level of knowledge and experience, and do not constitute sales specifications. No liability, warranty or guarantee of product performance is created by this document. It is the buyer's responsibility to inspect and test our products in order to determine the suitability for the buyer's application.

Ravago Group Headquarters

Moerenstraat 85A
B - 2370 Arendonk

Tel: +32 (0)14 67 25 11
Fax: +32 (0)14 67 20 12

www.ravago.com
manufacturing@ravago.com

Issue Date:
Feb 2008

Page 1 of 1

Příloha 3 - Materiálový list pro materiál PP Scolefin 34 G 10-0



Scolefin® 34 G 10-0

Polypropylene
Prime Compound

Description:

PPH, 40% glass filled, chemically coupled, long term heat stabilized, natural

General

MFI (230°/2,16kg)	ISO 1133	2	g/10min
Density	ISO 1183	1.2	g/cm³

Thermal

HDT/A (1,8 MPa)	DIN en ISO 75	148	°C
-----------------	---------------	-----	----

Mechanical

Ball indentation hardness H132/30	ISO 2039-1	120	MPa
Tensile strength (5mm/min)	ISO 527	95	N/mm²
Charpy notched impact strength (23°C)	ISO 179/1eA	10	kJ/m²
Charpy impact strength (23°C)	ISO 179	40	kJ/m²
Tensile modulus	ISO 527	8000	N/mm²

Various

Ash content (625°C)	DIN EN 60	40	%
---------------------	-----------	----	---

Datasheet

The data and information contained herein are typical average values, based on our current level of knowledge and experience, and do not constitute sales specifications. No liability, warranty or guarantee of product performance is created by this document. It is the buyer's responsibility to inspect and test our products in order to determine the suitability for the buyer's application.

Ravago Group Headquarters

Moerenstraat 85A
B - 2370 Arendonk

Tel: +32 (0)14 67 25 11
Fax: +32 (0)14 67 20 12

www.ravago.com
manufacturing@ravago.com

Issue Date:
Jul 2008

Page 1 of 1